GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO | SGIRPC

REPORTE 3 DNV ANÁLISIS CAUSA-RAÍZ

NO ACEPTADO POR LA SECRETARÍA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS Y PROTECCIÓN CIVIL

INTRODUCCIÓN

El 12 de mayo del 2021, la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil (SGIRPC) contrató a la empresa DNV GL MEXICO, con el objeto de elaborar un Dictamen Técnico que explicara las causas del colapso, y un Análisis Causa Raíz (ACR) que profundizara sobre las causas básicas y/o subyacentes.

El objetivo del Gobierno de la Ciudad fue contratar a una empresa externa independiente que investigara el accidente de la Línea 12 para conocer la verdad de lo sucedido y a su vez contar con información que evitara que un incidente igual o similar volviera a suceder en el futuro.

El 16 de junio del 2021, la empresa entregó a la SGIRPC el Dictamen Técnico Preliminar - Fase I, en el cual dio a conocer sus primeros hallazgos. Éstos se centraron primordialmente en deficiencias en la construcción del tramo colapsado de la Línea 12.

El 7 de septiembre del 2021, DNV entregó a la SGIRPC el Dictamen Técnico Final – Fase II, en el cual concluyó que el colapso se debió a problemas de diseño y construcción. Específicamente señaló la mala colocación o ausencia de pernos y soldaduras deficientes. Adicionalmente concluyó que la falta de apego a la normatividad de construcción de puentes en el proyecto ejecutivo también contribuyó al colapso.

Aunque la empresa se comprometió a entregar en octubre del 2021 el Reporte Único de Resultados de Análisis Causa Raíz (ACR) - Fase III, en los avances presentados, la SGIRPC observó diversas deficiencias e inconsistencias en el análisis. Éstas también fueron señaladas en las reuniones presenciales con el Comité de Apoyo del Gobierno de la Ciudad de México. Entre otros temas, se planteó a DNV la existencia de contradicciones importantes al señalar que se debían hacer inspecciones conforme al manual de mantenimiento, al mismo tiempo que establecieron que el manual era deficiente. Ésto llevó a que la empresa no presentara el documento en la fecha originalmente planteada.

Es importante señalar que el contrato entre la empresa y la SGIRPC, en su cláusula Novena establece que, una vez entregado el documento, la SGIRPC podrá verificar la calidad del servicio contratado y, en caso de detectar y/o determinar la existencia de alguna deficiencia se le notificaría por escrito a fin de que proceda a corrregirlas.

El 15 de febrero del 2022, la SGIRPC envió a la empresa un oficio en el cual se le hicieron una serie de comentarios y observaciones sobre el borrador preliminar del Reporte Único de Resultados de Análisis Causa Raíz (ACR) - Fase III, por considerar que el trabajo aún no cumplía con lo establecido en el contrato, y por tanto no permitía identificar con claridad la causa raíz del colapso.

A pesar de ello, la empresa entregó el Reporte Único de Resultados de Análisis Causa Raíz (ACR) - Fase III, el 28 de febrero de 2022, el cual, lamentablemente, no cumplió con las especificaciones solicitadas en el contrato celebrado. Ésto contrasta con los documentos correspondientes al Dictamen Técnico Preliminar - Fase I y el Dictamen Técnico Final - Fase II, que sí contaron con los elementos suficientes y la calidad requerida.

Posteriormente, en los oficios SGIRPC/DGAR/0723/2022 del 10 de marzo del 2022, SGIRPC/DGAR/0901/2022 del 29 de marzo y SGIRPC/DGAR/1101/2022 del 20 de abril, se señalan las deficiencias encontradas en el Reporte Único de Resultados de Análisis Causa Raíz (ACR) - Fase III, tales como que:

1. **no consideraron en su análisis información sobre el llamado “tramo espejo” o “tramo gemelo” (un tramo de la Línea 12 que tiene una configuración estructural idéntica al tramo colapsado)**
2. **no presentaron hipótesis alternativas a investigar, su evaluación y las razones de su descarte.**

En particular se solicitó a la empresa que ahondara en las consecuencias del error de diseño señalado tanto en el Dictamen Final – Fase II como en el Análisis Causa Raíz – Fase III.

Estas observaciones se encaminaron a que DNV hiciera una valoración más profunda del fenómeno de “fatiga por distorsión inducida”, el cual es un daño recurrente al que han sido sometidas las vigas de acero de la Línea 12 debido al incumplimiento de la norma AASHTO de construcción de puentes en su diseño. Para esta observación se ofreció también información recabada por especialistas de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) que detectaron fracturas de fatiga por distorsión inducida en varios tramos de la Línea 12 (entre ellos el “tramo espejo” o “tramo gemelo”).

En todos los oficios enviados se advirtió a la empresa del desacuerdo de la SGIRPC sobre el uso de imágenes de Google Street View como referencia para llegar a conclusiones en el análisis estructural. Ésto debido a que los términos de servicio de Google son explícitos sobre el hecho de que las imágenes de sus servicios de Google Maps o Google Earth pueden diferir de las condiciones reales del sitio.

Adicionalmente, se le solicitó a la empresa que se apegara a la implementación de la metodología presentada originalmente por la propia empresa, llamada “técnica de análisis sistemático de causas basado en barreras” (BSCAT). Dicha metodología, que es marca registrada, tiene como objetivo identificar las “barreras preventivas” que, de haber funcionado, el colapso podría no haber ocurrido. Esta metodología cuenta con una serie de definiciones e instrumentos analíticos que no están presentes en el documento de Análisis Causa Raíz – Fase III entregado por la empresa, y que sí están en otros documentos elaborados por ellos mismos. Sumado a lo anterior, en el documento se confunden las causas directas del colapso (problemas de construcción y diseño) ya establecidas por la empresa en el Dictamen Final – Fase II, con las barreras preventivas que, según su propia definición, “son controles, sistemas, prácticas y procedimientos” que podrían

ÍNDICE DE COMENTARIOS

- **COMENTARIOS PORTADA**
- **COMENTARIOS PÁGINA IV**
- **COMENTARIOS PÁGINA V**
- **COMENTARIOS PÁGINA VI**
- **COMENTARIOS PÁGINA VII**
- **COMENTARIOS PÁGINA VIII**
- **COMENTARIOS PÁGINA IX**
- **COMENTARIOS PÁGINA 66**
- **COMENTARIOS PÁGINA 84**
- **COMENTARIOS PÁGINA 86**
- **COMENTARIOS PÁGINA 95**
- **COMENTARIOS PÁGINA 100**
- **COMENTARIOS PÁGINA 108**

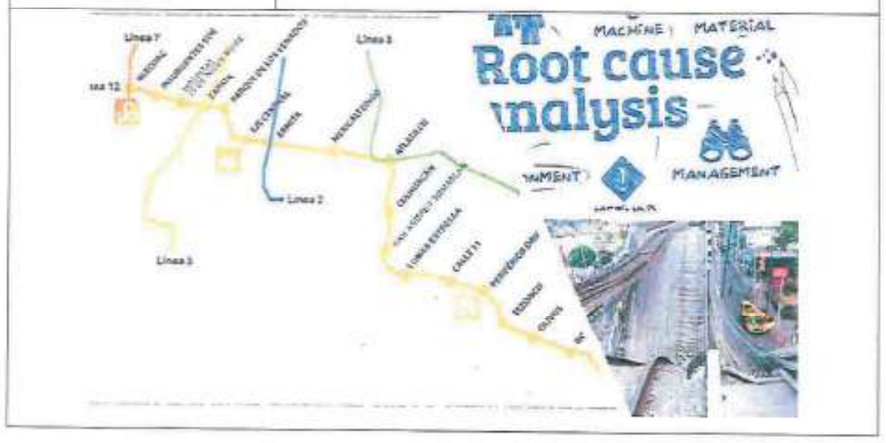
DNV

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)

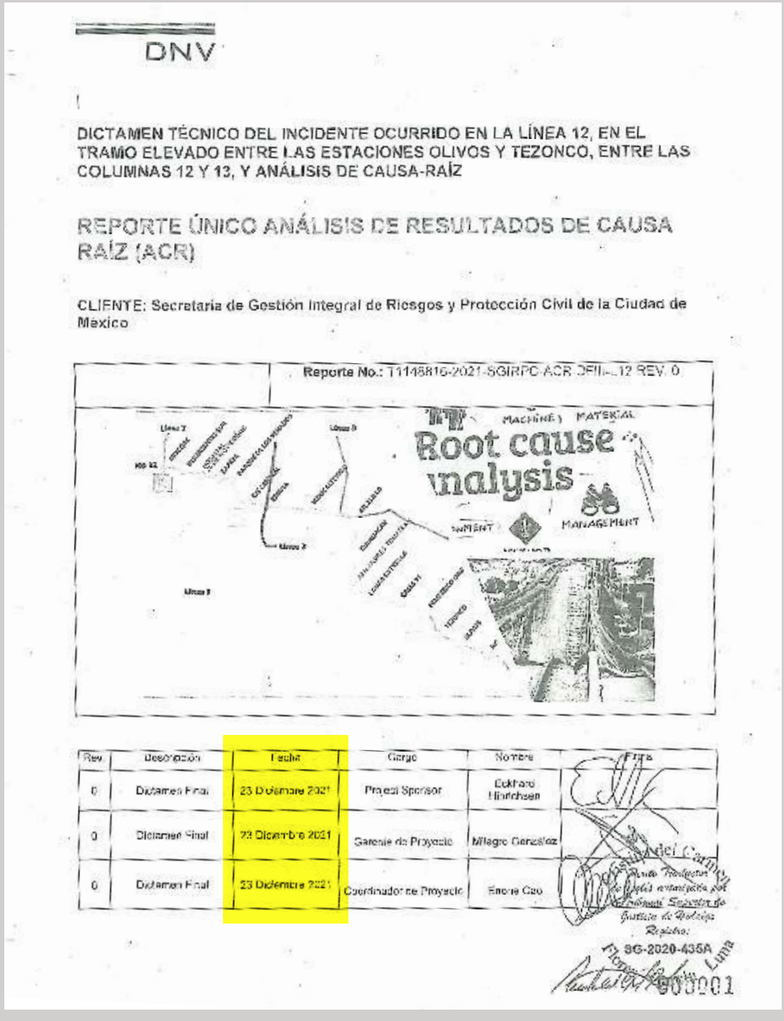
CLIENTE: Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México

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



Rev.	Descripción	Fecha	Cargo	Nombre	Firma
0	Dictamen Final	31 de Enero 2022	Project Sponsor	Eckhard Hinrichsen	
0	Dictamen Final	31 de Enero 2022	Gerente de Proyecto	Milagro González	
0	Dictamen Final	31 de Enero 2022	Coordinador de Proyecto	Enone Cao	

Esta es la última versión del Reporte Fase III presentada por la empresa DNV a la Secretaría de Gestión de Integral del Riesgo y Protección Civil (SGIRPC), en febrero del 2022. La versión que ha circulado en medios de comunicación es una versión anterior fechada en diciembre del 2021 y que tampoco fue recibida formalmente por la SGIRPC, como se muestra en la imagen inferior.


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

Root cause nalysis

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	

SG-2020-435A

DNV

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

Report title: Dictamen Final – Fase III

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

Date of issue: 31 de Enero 2022

Project No.: T1148816

Organisation unit: E-CU-X

Report No.: Rev. 0

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

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

Objetivo:
Por favor refiérase al Resumen Ejecutivo.

Sin comentarios

DNV

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 Bafferud, M.Sc. Principal Engineer – Materials Advisory	
Eric Ntambakwa, 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 2022. Todos los derechos reservados. Excepto cuando se anuncie 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:

Palabras Clave:
[Keywords]

0	2022-01-31	Primera Emisión

Sin comentarios

DNV

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 (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).

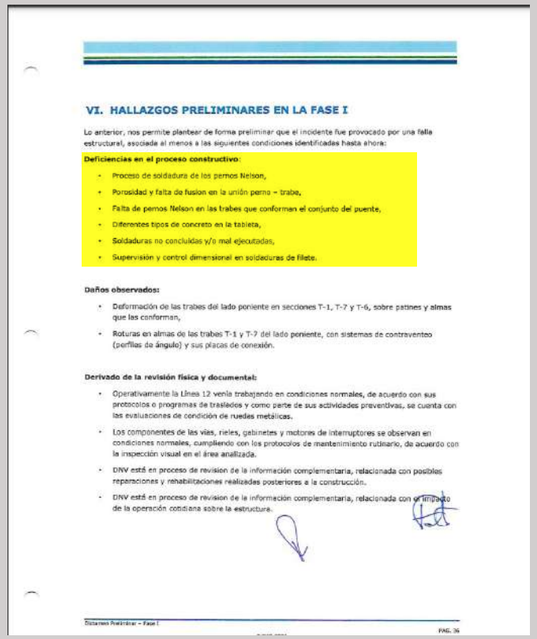
Los hallazgos y conclusiones que aquí se presentan se basan en los datos e información recibidos o adquiridos hasta el momento en el que se emite el reporte. DNV se reserva el derecho de modificar o complementar dichos hallazgos y conclusiones en caso de que surja nueva información.

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).

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

Los dos primeros reportes fueron entregados, respectivamente, el 21 de junio del 2021 y el 7 de septiembre del 2021. Éstos pueden consultarse en la página de internet **https://transparencialinea12.cdmx.gob.mx/informacion-sobre-el-incidente-de-la-linea-12/alcance-de-la-investigacion-de-dnv**. En el primer reporte los hallazgos principales se refieren a deficiencias en el proceso constructivo. En el segundo reporte, el Dictamen Final, se determinó que el colapso fue causado por problemas de construcción, como la falta de pernos, y deficiencias del diseño provocadas por el incumplimiento de las normas para construcción de puentes. •



VI. HALLAZGOS PRELIMINARES EN LA FASE I

Lo anterior, nos permite plantear de forma preliminar que el incidente fue provocado por una falla estructural, asociada al menos a las siguientes condiciones identificadas hasta ahora:

Deficiencias en el proceso constructivo:

- Proceso de soldadura de los pernos Nelson,
- Porosidad y falta de fusion en la unión perno – trabe,
- Falta de pernos Nelson en las trabes que conforman el conjunto del puente,
- Diferentes tipos de concreto en la tableta,
- Soldaduras no concluidas y/o mal ejecutadas,
- Supervisión y control dimensional en soldaduras de filete.

Daños observados:

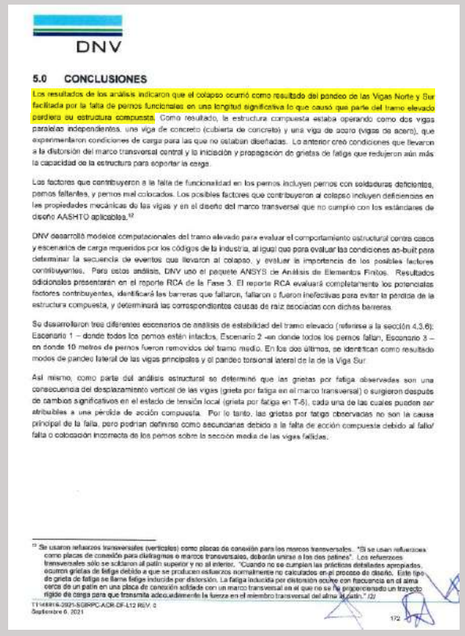
- Deformación de las trabes del lado poniente en secciones T-1, T-7 y T-6, sobre patines y almas que las conforman,
- Roturas en almas de las trabes T-1 y T-7 del lado poniente, con sistemas de contraventeo (perfiles de ángulo) y sus placas de conexión.

Derivado de la revisión física y documental:

- Operativamente la Línea 12 venía trabajando en condiciones normales, de acuerdo con sus protocolos o programas de traslados y como parte de sus actividades preventivas, se cuenta con las evaluaciones de condición de ruedas metálicas.
- Los componentes de las vías, rieles, gabinetes y motores de interruptores se observan en condiciones normales, cumpliendo con los protocolos de mantenimiento rutinario, de acuerdo con la inspección visual en el área analizada.
- DNV está en proceso de revisión de la información complementaria, relacionada con posibles reparaciones y rehabilitaciones realizadas posteriores a la construcción.
- DNV está en proceso de revisión de la información complementaria, relacionada con el impacto de la operación continua sobre la estructura.

Dictamen Preliminar – Fase I

PAG. 26



DNV

5.0 CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis indicaron que el colapso ocurrió como resultado del pandeo de las Vigas Norte y Sur facilitada por la falta de pernos funcionales en una longitud significativa lo que causó que parte del tramo elevado perdiera su estructura compuesta. Como resultado, la estructura compuesta estaba operando como dos vigas paralelas independientes, una viga de concreto (cubierta de concreto) y una viga de acero (vigas de acero), que experimentaron condiciones de carga para las que no estaban diseñadas. Lo anterior creó condiciones que llevaron a la distorsión del marco transversal contral y la iniciación y propagación de grietas de fatiga que redujeron aún más la capacidad de la estructura para soportar la carga.

Los factores que contribuyeron a la falta de funcionalidad en los pernos incluyen pernos con soldaduras deficientes, pernos faltantes, y pernos mal colocados. Los posibles factores que contribuyeron al colapso incluyen deficiencias en las propiedades mecánicas de las vigas y en el diseño del marco transversal que no cumplió con los estándares de diseño AASHTO aplicables.[2]

DNV desarrolló modelos computacionales del tramo elevado para evaluar el comportamiento estructural contra casos y escenarios de carga requeridos por los códigos de la industria, al igual que para evaluar las condiciones as-built para determinar la secuencia de eventos que llevaron al colapso, y evaluar la importancia de los posibles factores contribuyentes. Para estos análisis, DNV uso el paquete ANSYS de Análisis de Elementos Finitos. Resultados adicionales presentarán en el reporte RCA de la Fase 3. El reporte RCA evaluará completamente los potenciales factores contribuyentes, identificará las barreras que fallaron, fallaron o fueron ineficaces para evitar la pérdida de la estructura compuesta, y determinará las correspondientes causas de raíz asociadas con dichas barreras.

Se desarrollaron tres diferentes escenarios de análisis de estabilidad del tramo elevado (referirse a la sección 4.3.6): Escenario 1 – donde todos los pernos están intactos, Escenario 2 –en donde todos los pernos fallan, Escenario 3 – en donde 10 metros de pernos fueron removidos del tramo medio. En los dos últimos, se identifican como resultado modos de pandeo lateral de las vigas principales y el pandeo torsional lateral de la de la Viga Sur.

Así mismo, como parte del análisis estructural se determinó que las grietas por fatiga observadas son una consecuencia del desplazamiento vertical de las vigas (grieta por fatiga en el marco transversal) o surgieron después de cambios significativos en el estado de tensión local (grieta por fatiga en T-6), cada una de las cuales pueden ser atribuibles a una pérdida de acción compuesta. Por lo tanto, las grietas por fatiga observadas no son la causa principal de la falla, pero podrían definirse como secundarias debido a la falta de acción compuesta debido al fallo/ falta o colocación incorrecta de los pernos sobre la sección media de las vigas fallidas.

[2] Se usaron refuerzos transversales (verticales) como placas de conexión para los marcos transversales. "Si se usan refuerzos como placas de conexión para diafragmas o marcos transversales, deberán unirse a los dos patines". Los refuerzos transversales sólo se soldaron al patín superior y no al inferior. "Cuando no se cumplen las criterios detallados apropiados, ocurren grietas de fatiga debido a que se producen esfuerzos normalmente no calculados en el proceso de diseño. Este tipo de grieta de fatiga se llama fatiga inducida por distorsión. La fatiga inducida por distorsión ocurre con frecuencia en el área cerca de un patín en una placa de conexión soldada con un marco transversal en el que no se ha proporcionado un trayecto rígido de carga para que transmita adecuadamente la fuerza en el miembro transversal del alma al patín." (2)

T1148816-20(01-SGIRPC-ACR-DF-L12 REV. 0
Septiembre 6, 2021

172

DNV

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 subyacentes y el tablero de concreto de la parte superior es asegurada por pernos metálicos soldados al patín superior de las vigas de acero. Dichos pernos transfieren fuerzas de corte entre el tablero de concreto y las vigas de 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. El reporte de la fase 2 sobre el análisis de causas inmediatas se muestra en el Anexo A.

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.

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

Este párrafo es consistente con el peritaje de la Fiscalía General de Justicia (https://transparencialinea12.cdmx.gob.mx/peritaje-fgj), pues también se identificaron problemas de construcción, como la ausencia y mala soldadura de pernos, y el incumplimiento de la normatividad AASHTO, lo cual afectó el diseño.

El dictamen final Fase 2 de DNV llega a la siguiente conclusión:

DNV

5.0 CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis indicaron que el colapso ocurrió como resultado del pandeo de las Vigas Norte y Sur facilitada por la falta de pernos funcionales en una longitud significativa lo que causó que parte del tramo elevado perdiera su estructura compuesta. Como resultado, la estructura compuesta estaba operando como dos vigas paralelas independientes, una viga de concreto (cubierta de concreto) y una viga de acero (vigas de acero), que experimentaron condiciones de carga para las que no estaban diseñadas. Lo anterior creó condiciones que llevaron a la distorsión del marco transversal central y la iniciación y propagación de grietas de fatiga que redujeron aún más la capacidad de la estructura para soportar la carga.

Los factores que contribuyeron a la falta de funcionalidad en los pernos incluyen pernos con soldaduras deficientes, pernos faltantes, y pernos mal colocados. Los posibles factores que contribuyeron al colapso incluyen deficiencias en las propiedades mecánicas de las vigas y en el diseño del marco transversal que no cumplió con los estándares de diseño AASHTO aplicables.[12]

Los resultados del modelo de dnv concluyen que las fallas de diseño implicaban que, aunque se hubieran colocado la totalidad de los pernos, éstos habrían fallado al llegar a los 14 años de operación. Dicha conclusión se presenta en la página 66 de este reporte.

DNV

vías. Esta se considera la probable razón para las modificaciones en los paneles precolados durante la construcción, como se evidencia rellenado de los huecos para pernos no utilizados y que estuvieron mal alineadas con vigas principales y también la presencia de marcas de martillo neumático observadas en los patines superiores que sugieren la fabricación in situ de orificios para el soldado de los pernos.

- La resistencia a la fatiga de los pernos no cumplió con las especificaciones de AASHTO, aún en un escenario en el que el puente hubiera sido construido conforme a las especificaciones, se espera que los pernos más críticos hayan fallado luego del paso de 1.25 millones de trenes, o aproximadamente 14 años de operación.

DNV

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. 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 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.

Cristina del Carmen ... Perito Traductor Inglés autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo Registro ... G-2020-438A ... Luna

T1140610-2021-SGIRPC-ACR-DFIII-L12 Rev. 0
Enero 2022

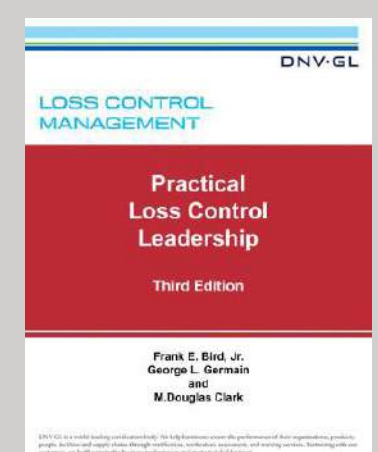
La definición de causa raíz que se usa en este párrafo y a lo largo del documento no es consistente con la definición de "causa raíz" de la metodología de DNV. La definición que usaron, como se aclara en una nota al pie en la página 100 del actual documento, se retomó de una glosario de manejo de ductos (PHMSA) que dice: "causa raíz es el factor causal subyacente en un accidente u otro escenario de evento que si fuera removido habría prevenido la ocurrencia del accidente o evento".

Sin embargo, la definición que proviene del libro de la metodología SCAT (técnica de análisis sistemático de causas) publicado por DNV dice:

"Las causas básicas son las enfermedades o causas reales detrás de los síntomas; las razones por las que actos y condiciones subestándar ocurren; los factores que, cuando se identifican, permiten control sustantivo.

Frecuentemente a estas se les refiere como causas raíz, causas reales, causas indirectas, causas subyacentes o contribuyentes. Esto es porque las causas inmediatas (los síntomas, los actos o condiciones subestándar) usualmente son evidentes, pero toma un poco más exploración para llegar a las causas básicas y tomar el control de ellas".

Bird, Frank E, and George L. Germain.(2003) Practical Loss Control Leadership. Loganville, GA: Det Norske Veritas (U.S.A.), Inc.



DNV

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 techo 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.

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): La soldadura e Instalación de pernos adecuada 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.

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

Sin comentarios

DNV

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 este 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.

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

Barrera 4 (Fallida): Inspecciones Detalladas de la Obra Civil de Acuerdo con el Manual de Mantenimiento.

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 afectaciones a la estructura, incluido el pandeo en el atiesador longitudinal, la deflexión del marco transversal central y la eflorescencia, era visible en imágenes de Google adquiridas desde el nivel de la calle, indicando que la afectación habría sido visible mediante una inspección visual que sea consistente con las prácticas típicas de la Industria

Aunque DNV señala que las inspecciones debieron de hacerse conforme al manual de mantenimiento, un poco más adelante, en el mismo reporte, advierten que el manual de mantenimiento es deficiente, y que por ejemplo éste no señala los alcances que deben tener las inspecciones; y es impreciso sobre cómo medir las deflexiones de elementos metáli- cos (páginas IX y 109).

Recomendaciones:

- Revisar el manual de mantenimiento para especificar lo siguiente: (1) aclarar el alcance de cada inspección, (2) detallar el trabajo a realizar, (3) identificar las credenciales necesarias de quienes llevan a cabo la inspección, (4) identificar los recursos que se utilizarán y (5) identificar a las partes responsables dentro del STC de ejecutar inspecciones y dar seguimiento a las inspecciones. Con base en los hallazgos del RCA técnico, se deben incluir estos detalles específicos:
  - Aclarar bajo qué escenarios se miden las deflexiones
  - Identificar cómo se debe medir la deflexión para casos de carga muerta y carga viva
  - Identificar un valor para una deflexión negativa inaceptable bajo carga muerta,
- Realizar inspecciones rutinarias requeridas en el manual de mantenimiento revisado y corregido.

La SGIRPC en varias ocasiones solicitó a DNV no usar imágenes de Google Street View como evidencia, pues los términos de servicio de Google mencionan que “puede que las con- diciones reales del sitio difieran de los resultados de los mapas y del contenido por lo que el usuario es responsable en todo momento de su conducta y las con- secuencias de esta”

Google

3. **Condiciones reales: asunción de riesgos.** Al utilizar los datos de mapas, tráfico, indicaciones y otro contenido de Google Maps/Google Earth, puede que las condiciones reales difieran de los resultados de los mapas y del contenido, por lo que el usuario deberá aplicar su propio criterio y utilizar Google Maps/Google Earth bajo su propia responsabilidad. El usuario es responsable en todo momento de su conducta y las consecuencias de esta.

Las causas presentadas por DNV como causas del colapso del tramo elevado (pér- dida de la estructura compuesta por las fallas de diseño e instalación inadecuada de pernos) no hubieran sido identificables mediante una inspección visual, como las solicitadas por el manual de mantenimiento y ejecutadas entre el 2019 y 2020. En el Dictamen Final de Fase II, incluso se dice que la deflexión que DNV retoma de un video, no era detectable en una inspección visual simple. (Página V y 71, ver siguiente página).

Página en blanco

DNV

A continuación, se muestra un resumen de hallazgos y observaciones adicionales:

- Los componentes de la vía y las instalaciones que se encuentran al lado de la vía (balasto, durmientes, fijaciones, rieles, interruptores, uniones, cableado y ductos, línea aérea, etc.) se encontraban en buenas condiciones generales. No hubo evidencia de que cualquiera de los componentes inspeccionados o instalaciones contribuyeran con la falla.
- Se identificó una grieta de fatiga de 8.9 cm en el patín inferior de la Viga T-6 en la ubicación que la une con la Viga Norte. La grieta se inició en la punta de la soldadura de filete que une el patín inferior de la Viga T-6 y el alma.
- Se identificó una grieta de fatiga, correspondiente a aproximadamente el 72% del área transversal del cordón superior, en el lado norte del marco transversal central. La grieta inició desde la punta(s) de la soldadura(s) de filete que unen al cordón superior con el reforzamiento vertical.
- La calidad y desempeño (pruebas de tensión y flexibilidad) de las soldaduras de los pernos que se inspeccionaron y probaron no cumplieron con los requerimientos de AWS D1.1. /3/ /4/ Los ferrules que se usaron para retener la soldadura fundida seguían presentes alrededor de los pernos, impidiendo que se pudieran realizar revisiones de calidad que podrían haberse realizado durante la construcción. De conformidad con AWS D1.1, debe realizarse una inspección visual en el 100% de las soldaduras de los pernos (Sección 7.8.1) y "los destellos de la soldadura de 360 grados alrededor del perno deben ser visibles".
- Se observaron prácticas de soldadura deficientes, específicamente las relacionadas con el uso de barras de acero como material de relleno de la soldadura.
- La deformación se identificó primero en el reforzamiento longitudinal de la Viga Norte en Enero de 2017, lo que indica que la estructura ya se encontraba en una condición comprometida antes del terremoto de Puebla de 2017, y no como consecuencia del terremoto. Esto es consistente con los resultados del análisis de respuesta estructural al terremoto de la Sección 4.3.2 que indican que la carga de operación de trenes en movimiento es más severa en amplitud y ciclos que la que ejerció el terremoto. Estas deformaciones no eran detectable en una inspección visual simple.
- Se identificó deflexión descendente significativa a partir de una inspección en video realizada por drones en diciembre de 2019. La Viga Norte y la Viga T-6 mostraron la deflexión mayor. La deflexión vertical estimada de la Viga Norte fue mayor a 7.62 cm; que es el espesor del patín inferior de la subviga T-7. Esta deflexión no era detectable en una inspección visual simple.
- Se identificó una progresión en la mancha de humedad, eflorescencia y separación de la unión del concreto precolado en el marco transversal central entre 2015 y 2019, indicando que el agua se estaba acumulando en esta ubicación y que estaba encontrando rutas de salida (por ejemplo, a través de las grietas) desde la parte superior hasta el fondo de la cubierta.
- La sección transversal geológica del segmento Olivos – San Lorenzo Tezonco indica que el sitio del incidente está ubicado en una zona de transición con base rocosa relativamente poco profunda cerca de la estación de los Olivos y que va incrementando el espesor del suelo sobre la base rocosa conforme avanza hacia la estación San Lorenzo Tezonco. Los sistemas de cimentación del segmento parecen ser apropiados para las condiciones de la subsuperficie y las condiciones geológicas no parecen haber sido un factor contribuyente a la falla.

DNV

ISSA realizó inspecciones y evaluaciones de mantenimiento 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, no se observaron desplazamientos en las Columnas 12 y 13.

La falla en la realización de las inspecciones detalladas 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, se ejecuten y se documenten formalmente, y verificar cumplimiento con los estándares aplicables.
- 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 revisado y corregido.
- 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.

Cristina del Carmen Texto Traducción de Inglés encargado por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo Registro: SG-2020-435A Ix Luna Flores García

Como señala el propio reporte sí se hicieron inspecciones a la Línea 12. **Una de ellas fue en el 2019**, que hizo la empresa ISSA; y **otra se hizo en junio del 2020.** En el año 2021 en abril se adjudicó el contrato para hacer **una nueva inspección** a partir de mayo.

MONITOREO E INSTRUMENTACIÓN SISTEMÁTICA Y SEGUIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DEL TRAMO ELEVADO DE LA LÍNEA 12.

Contrato No. SDGM-GOM-LP-1-12/19

INFORME

No. CLAVE: 2019-ISSA-TOP-L12M-000-III-221-221-I-0	FECHA: DICIEMBRE / 2019	HOJA 1 DE 10
TITULO: INFORME FINAL DE DESPLOMOS DE LAS COLUMNAS DEL VIADUCTO ELEVADO DE LINEA 12, INCLUYE ANALISIS Y DETERMINACION DE SU COMPORTAMIENTO.	ESTACIÓN / TRAMO: ZAPOTITLÁN - CULHUACÁN	
ISSA Ingeniería, Servicios y Sistemas Aplicados S.A. de C.V.	SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO	

SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO

SUBGERENCIA DE PROYECTOS

2020

INFORME DE REVISION AL TRAMO ELEVADO DE LA LÍNEA 12, DE LA ESTACIÓN CULHUACÁN A LA TRANSICION TLALTENCO DEBIDO AL EVENTO SÍSMICO (2020.06.23)

1. INTRODUCCION

El presente informa toma como base las acciones establecidas en la Norma de Construcción de la Administración Pública de la Ciudad de México, Libro 8, Tomo II Conservación y Mantenimiento de Obras y Equipos. Obra Civil, Edificación, Capítulo Generalidades, Pág. 8, donde menciona:

"E.03. Con base en lo anterior se deben establecer los programas de mantenimiento preventivo y la prioridad de los trabajos de mantenimiento correctivo llevando el control mediante revisiones rutinarias y periódicas a los diversos elementos del edificio, además se deben efectuar ***revisiones extraordinarias*** *cuando se* ***presenten eventos tales como sismos****, fenómenos meteorológicos, incendios, modificaciones a las condiciones de carga o cualquiera otra situación que afecte al inmueble en su conjunto o en sus elementos componentes."*

Respecto al sismo con fecha del 23 de junio de 2020, de acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional se registró un sismo de magnitud de 7.5 localizado a 23 km al Sureste de Crucecita, Oaxaca con latitud 15.57 y longitud -96.09; profundidad de 5 kilómetros, a las 10:29 horas tiempo del centro de México, por lo que se procedió a la inspección post sísmica del tramo elevado de Línea 12.

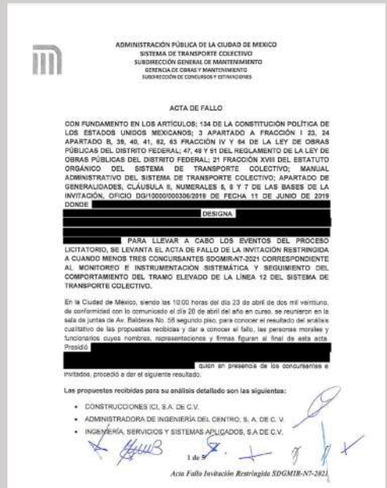
2. OBJETIVO.

Objetivo General

El propósito de la inspección de tramos de infraestructura elevada es prevenir fallas en los componentes de las estructuras, identificar riesgos asociados a la interacción suelo estructura y afectaciones con el entorno.

Objetivo Específico

Inspeccionar visualmente el estado que guarda cada uno de los elementos que componen la Línea 12.



ADMINISTRACIÓN PÚBLICA DE LA CIUDAD DE MEXICO
SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE MANTENIMIENTO
GERENCIA DE OBRAS Y MANTENIMIENTO
SUBDIRECCIÓN DE CONCURSOS Y DITTAMENES

ACTA DE FALLO

CON FUNDAMENTO EN LOS ARTÍCULOS: 134 DE LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS; 3 APARTADO A FRACCIÓN I 23, 24 APARTADO B, 39, 40, 41, 62, 63 FRACCIÓN IV Y 64 DE LA LEY DE OBRAS PÚBLICAS DEL DISTRITO FEDERAL; 47, 48 Y 51 DEL REGLAMENTO DE LA LEY DE OBRAS PÚBLICAS DEL DISTRITO FEDERAL; 21 FRACCIÓN XVIII DEL ESTATUTO ORGÁNICO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO; MANUAL ADMINISTRATIVO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO; APARTADO DE GENERALIDADES, CLÁUSULA 8, NUMERALES 8, 8 Y 7 DE LAS BASES DE LA INVITACIÓN, OFICIO DGI100000000306/2019 DE FECHA 11 DE JUNIO DE 2019 DONDE [redacted] DESIGNA [redacted] PARA LLEVAR A CABO LOS EVENTOS DEL PROCESO LICITATORIO, SE LEVANTA EL ACTA DE FALLO DE LA INVITACIÓN RESTRINGIDA A CUANDO MENOS TRES CONCURSANTES SDGMIR-N7-2021 CORRESPONDIENTE AL MONITOREO E INSTRUMENTACIÓN SISTEMÁTICA Y SEGUIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DEL TRAMO ELEVADO DE LA LÍNEA 12 DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO.

En la Ciudad de México, siendo las 10:00 horas del día 23 de abril de dos mil veintiuno, de conformidad con lo comunicado el día 20 de abril del año en curso, se reunieron en la sala de juntas de Av. Ralsteria No. 58 segundo piso, para conocer el resultado del análisis cualitativo de las propuestas recibidas y dar a conocer el fallo, las personas morales y funcionarios cuyos nombres, representaciones y firmas figuran al final de esta acta presidió [redacted] quien en presencia de los concursantes e invitados, procedió a dar el siguiente resultado:

Las propuestas recibidas para su análisis detallado son las siguientes:

- CONSTRUCCIONES ICI, S.A. DE C.V.
- ADMINISTRADORA DE INGENIERÍA DEL CENTRO, S. A. DE C. V.
- INGENIERÍA, SERVICIOS Y SISTEMAS APLICADOS, S.A DE C.V.

1 de 9

Acta Fallo Invitación Restringida SDGMIR-N7-2021

En estas recomendaciones se señalan las deficiencias del manual de mantenimiento y se recomiendo revisarlo y corregirlo. Se señala que no es claro en qué escenario se deben medir deflexiones, ni como se deben medir estas deflexiones en caso de que existan. Por lo tanto, hay una contradicción con la barrera 4 que indica que las inspecciones se debieron de hacer conforme al manual de mantenimiento tal y como está.

DNV

Tabla de Contenido

1.0	ANTECEDENTES	21
1.1	Estructuras Compuestas	22
1.2	L12	23
1.3	Accidente del 3 de mayo de 2021	24
1.4	Contratación	29
1.4.1	Momento de la Construcción	29
1.4.2	Estructura Actual	35
2.0	ENFOQUE TÉCNICO	36
2.1	Metodología de la Técnica para el Análisis Causal Sistemático basada en Barreras (Barrier-based Systematic Causal Analysis Technique)	36
2.2	Captura de Evidencia	37
2.2.1	Entrevistas con el Personal Clave	38
2.2.2	Investigaciones in situ	39
2.2.3	Revisión de documentos	39
2.2.4	Análisis Complementarios	41
2.2.4.1	Análisis Detallados de Elementos Finitos del Puente elevado Colapsado	41
3.0	RESUMEN DE ACTIVIDADES REALIZADAS POR DNV	41
3.1	Hallazgos de las Entrevistas al Personal Clave	41
3.1.1	Observaciones sobre los Sistemas de Rieles	42
3.1.2	Observaciones Estructurales	43
3.1.3	Observaciones Geotécnicas	45
3.2	Investigación de Causas Inmediatas y Análisis Estructurales	45
3.3	Análisis de Elementos Finitos y Revisión del Diseño	48
3.3.1	Modelado del peso muerto considerando la construcción en etapas	48
3.3.2	Evaluación del Puente elevado "Como se Diseñó"	49
3.3.2.1	Comentarios sobre el Paquete de Documentación del Diseño	49
3.3.2.2	Requerimientos Generales de Dimensión y Detalles para componentes de acero	50
3.3.2.3	Requerimientos generales de dimensión y detalle para los componentes de concreto	50
3.3.2.4	Consideraciones del Estado Límite	51
3.3.2.5	Resistencia I Combinación de Cargas	52
3.3.2.6	Resultados de la Condición de Evento Extremo I	53
3.3.2.7	Resultados para la Combinación de Carga de Fatiga	53

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

Luna

Sin comentarios

3.3.3	Análisis del colapso	59
3.3.3.1	Descripción del Análisis	59
3.3.3.2	Análisis de la Etapa del Colapso	61
3.4	Conclusión de los Análisis de Diseño y Colapso	65
3.4.1	Evaluación del Diseño	65
3.4.2	Análisis de la Etapa del Colapso	66
4.0	LÍNEA DEL TIEMPO DE EVENTOS	67
4.1	Línea del Tiempo Histórica	67
4.1.1	Diseño de la L12	69
4.1.1.1	Obras de Ingeniería Civil	69
4.1.1.2	Material Rodante	71
4.1.1.3	Sistemas de Rieles	71
4.1.2	Construcción de la L12	71
4.1.2.1	Ruta de la L12	75
4.1.2.2	Obras de Ingeniería civil – Desviaciones del Diseño y de los estándares de Diseño	76
4.1.2.3	Material Rodante	77
4.1.2.4	Sistemas de Rieles	77
4.1.2.5	Modificaciones al Material Rodante y a los Sistemas de Rieles después de la Puesta en Marcha	78
4.1.3	Inspección, Mantenimiento y Reparación de las Obras de Ingeniería Civil	81
4.1.3.1	Inspecciones	82
4.1.3.2	Mantenimiento y Reparación de Obras de Ingeniería Civil	96
4.1.3.3	Mantenimiento y Reparación de Material Rodante	96
4.1.3.4	Mantenimiento y Reparación de los Sistemas de Rieles	96
4.1.4	Operación de la L12	97
5.0	ANÁLISIS DE CAUSAS DE RAÍZ TÉCNICO	100
5.1	Identificación y Análisis de Barreras	100
5.2	Barreras Preventivas	102
5.2.1	Barrera 1: Diseño en cumplimiento con los Estándares AASHTO	102
5.2.2	Barrera 2: Certificación y Supervisión de Obras de Ingeniería Civil	103
5.2.3	Barrera 3: Instalación Apropiada de Pernos Conforme a los planos del Diseño	105
5.2.4	Barrera 4: Inspección Regular de Obras de Ingeniería Civil	108
6.0	RESUMEN	109

Cristina del Carmen Flores García
Perito Traductor de Inglés autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo
Registro SG-2020-436A

Sin comentarios

Anexos

Anexo A – Reporte Fase 2 de DNV – Análisis de Causas Inmediatas

Anexo B – Referencias

Anexo C – Cartas emitidas por DNV para las entrevistas con el Personal Clave

Anexo D – Construcción de Modelo de Análisis de Elementos Finitos

Anexo E – Resumen de la revisión de DNV: Diseño, Construcción, Mantenimiento y Reparación de Material Rodante y Sistema Ferroviario

Anexo F – Lecciones Aprendidas adicionales y Recomendaciones

Anexo G – Descargos de Responsabilidad Adicionales

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

Sin comentarios

DNV

Lista de Tablas

Tabla 1- Resumen del personal entrevistado por DNV. 38

Tabla 2- Resumen del personal que se solicitó ser entrevistado por DNV, pero que no le fue posible acudir a la cita: 39

Tabla 3- Resumen de observaciones pertenecientes a los miembros estructurales de acero 42

Tabla 4- Resumen de observaciones sobre los miembros estructurales de acero. 44

Tabla 5- Factor de Carga para la Condición del Diseño 52

Tabla 6- Factores de utilización para la Condición de Resistencia 1 de AASHTO 53

Tabla 7- Factores de Utilización para la Condición de Evento Extremo 1 de AASHTO 53

Tabla 8- Conteo de Ciclos de los Análisis del Tren en Movimiento 56

Tabla 9- Estimados de daño acumulado en los pernos críticos 58

Tabla 10- Resistencia a la Fatiga para Vigas Principales, Viga T-6, y Marcos Transversales. 59

Tabla 11- Resumen de las actividades de construcción entre las Columnas 12 y 13. La ubicación de la Columna 12 y Columna 13 referidas como 10+242 y 10+272, respectivamente. Los cimientos se denotan como "Z" para "Zapata" y las columnas/soportes se denotan como "A" de "Apoyo". 72

Tabla 12- Resumen de elementos y su deflexión permisible conforme al manual de mantenimiento de la L12.[1063] 82

Tabla 13- Programa de servicio de la L12 para 2019 y 2020 mostrando servicio en días laborales, sábados, domingos y días festivos. 99

Tabla 14- Resumen de símbolos de estatus de las barreras y sus descripciones. 100

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

Sin comentarios

DNV

Lista de Figuras

Figura 1 - Representación esquemática de (a) un ensamble simplificado de la estructura compuesta de acero y concreto2 y (b) una ilustración simplificada que muestra la respuesta de una estructura compuesta desacoplada (1) vs una estructura acoplada (2)[3] 22

Figura 2 - Mapa del sistema de la L12 (la Línea Dorada), que opera al sur y sureste de la Ciudad de México, México El Accidente en la Línea 12 ocurrió entre las Estaciones San Lorenzo Tezonco y Olivos (cuadro punteado en rojo). La escala es en kilómetros 24

Figura 3 - Fotografía que muestra la ubicación del Accidente en la Línea 12 en relación con la Estaciones San Lorenzo Tezonco y Olivos; consulte la ubicación en la Figura 2. La escala se encuentra en metros 25

Figura 4- Imagen de Google Earth que muestra la ubicación de la falla, compuesta de las Secciones Este y Oeste que colapsaron en la L12 entre las Columnas 12 y 13, en comparación con el plano as-built de la misma ubicación, consulte la ubicación en la Figura 4. Las unidades en el plano se encuentran en centímetros.[758] 26

Figura 5- Esquema que muestra los detalles de cómo fue construido de la sección de la L12 que falló. Reproducido desde el archivo de nombre: 210602 PMDF-12-EST-612155-IV-0018-03400-P-AB.pdf, que contenía un error en el posicionamiento. [758] 27

Figura 6- Imágenes que muestran aproximadamente la misma orientación de vista (es decir, hacia la Estación San Lorenzo Tezonco; Oeste) del puente elevado entre las Columnas 12 y 13 (a) el 18 de mayo de 2021 y (b) en junio de 2019. La fotografía en (a) fue tomada por el personal de DNV y la imagen (b) es una imagen de Google Street View 28

Figura 7- Esquema que muestra la estructura del Proyecto L12 desde su concepción hasta su construcción. 29

Figura 8- Esquema que muestra el proceso de solicitud de información para el análisis de causas inmediatas y para el ACR técnico realizados por DNV 40

Figura 9 - Historial de tensión sobre el cordón superior del elemento marco transversal a medio tramo 54

Figura 10 - Historial de tensión sobre el cordón superior del elemento marco transversal a medio tramo 54

Figura 11- Historial de tensión en vigas principales 55

Figura 12- Historial de tensión en T-6 55

Figura 13- Fuerzas de corte en un perno localizado en la esquina suroeste (SWW) y de un perno localizado a medio tramo de la viga sur (S) 55

Figura 14- Curva S-N de los pernos conforme a AASHTO LRDF 4a Edición 57

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

Sin comentarios

Figura 15- ACS-3 Ploteos de la deformación..... 64

Figura 16- Curva de Deflexión de Carga 65

Figura 17- Línea del tiempo histórica que muestra los eventos clave de la L12 desde el inicio de contrataciones en enero de 2008. La línea del tiempo incluye fechas de: (1) actividades de contratación (diamantes y corchetes verdes), (2) actividades de construcción original y puesta en marcha (corchetes anaranjados), (3) mantenimiento y operaciones de la L12 (círculos y corchetes azules), (4) temblores (cuadros morados), y (5) eventos significativos durante la operación de la L12 ("X" y corchetes rojos). 68

Figura 18- Detalles de ilustración que muestran las secciones transversales de las subvigas T-1, T-2, T-3, T-5, T-6, y T-7. Se anota el número y distribución de los pernos. Unidades en cm.[759] 70

Figura 19- Línea del Tiempo del periodo en el que se reportó desgaste anómalo. [1064] 78

Figura 20- Fotografías que muestran el cambio en el perfil del riel, tipo de durmientes y sistemas de sujeción (PK10+800)..... 81

Figura 21- Fotogramas extraídos de la secuencia en video de una cámara de seguridad en la calle (C5) aproximadamente a las 22:11:15 del 3 de mayo de 2021. El marco superior se encuentra justo antes del inicio del colapso y el marco inferior aproximadamente 0.5 segundos después..... 88

Figura 22- Fotograma extraído de la secuencia en video de una cámara de seguridad en la calle (C5) aproximadamente a las 22:11:15 del 3 de mayo de 2021, aproximadamente 1 segundo después del inicio del colapso. 89

Figura 23- Fotograma adquirido de una secuencia en video de una inspección por drones realizada en diciembre de 2019 que muestra una importante deflexión negativa de la Viga Norte y de la Viga T-6 entre las Columnas 12 y 13. 90

Figura 24- Fotograma adquirido de una secuencia en video de una inspección por drones realizada en diciembre de 2019 que muestra la deflexión negativa de la Viga Sur entre las Columnas 12 y 13. 91

Figura 25- Fotograma adquirido de una secuencia en video de una inspección por drones realizada en diciembre 2019 que no muestra deflexión observable en la viga del lado sur del tramo entre las Columnas 13 y 14; un tramo al Este del sitio del accidente. 92

Figura 26- Captura de pantalla tomada de Google Street View (agosto 2019) que muestra una separación entre el concreto precolado, mancha de humedad, y eflorescencia en la ubicación de la falla. 93

Figura 27- Captura de pantalla tomada de Google Street View (agosto 2019) que muestra las áreas de deformación a lo largo del atiesador longitudinal en la Viga Norte. Nota: Se ajustó el contraste y el brillo de la imagen original para mejorar las áreas obscuras. área indicada en la Figura 26. 94

Perito Traductor de Inglés autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Cataluña
Registro: SG-2020-435A

Sin comentarios

DNV

Figura 28- Fotografía que muestra las ubicaciones de la deformación principal en la Viga Norte y en la Viga T-6 de la Sección Oeste, en relación con la deformación anterior capturada por Google Street View en agosto de 2019, refiérase a la Figura 27. 95

Figura 29- Captura de pantalla tomada de Google Street View (marzo 2020) que muestra el marco transversal central (Marco transversal 3) que parece haberse doblado (arqueado) hacia la Columna 13. 95

Figura 30- Fotografía de la ubicación de la falla que muestra el cordón superior del Marco transversal 3 que se arqueó en la misma dirección, hacia la Columna 13, como el que se muestra en la Figura 29. 96

Figura 31- Gráfica de barras que muestra el estimado conservador del número de días de operación con base en las actividades conocidas. 98

Figura 32- Diagrama de Incidentes BSCAT™ del Accidente en la L12 que muestra la explicación ampliada (texto en verde) y el estatus de la barrera en el momento de la evaluación (apariencia de la barrera). 102

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

Sin comentarios

DNV

Acrónimos, Abreviaturas y Definiciones Selectas

Acrónimo o Abreviatura	Significado
A	Apoyo (significado: Columnas o Soportes)
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACS	Análisis de la Etapa de Colapso
ASCE	American Society of Civil Engineers (Asociación Americana de Ingenieros Civiles)
ALSTOM	Alstom Mexicana, S.A. de C.V.
ASTM	American Society for Testing and Materials (Asociación Americana de Pruebas y Materiales)
ATO	Sistema Automático de Operación del Tren
ATP	Sistema Automático de Protección del Tren
AWS	American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadura)
BSCAT™	Barrier-based Sistematic Causal Analysis Technique (Técnica Sistemática de Análisis Causal baada en Barreras)
DB	Db International GmbH
CAF	CAF México S.A. de C.V.
CARSO	Carso Infraestructura Y Construcción, S.A.B. de C.V.
CAPEX	Gasto de capital
CBTC	Control Automatic Train Protection / Automatic Train Operation (Progtección de Control Automático del Tren / Operación Automática del Tren)
CCTV	Circuito Cerrado de TV
CDMX	Ciudad de México
COMINSA	Consultoría Metropolitana de Ingeniería, S.A.
CONIISA	Consultoría Integral En Ingeniería, S.A. de C.V.
COSMOS	Sistema TCMS diseñado por CAF
CT	Hora del centro
CVN	Charpy con ranura en V
DB	DB International GmbH
DGCOSTC	Dirección General de Construcción y Obras del Sistema de Transporte Colectivo
DGOT	Dirección General de Obras para el Transporte
DGPM	Dirección General del Proyecto Metro
DL	Carga Muerta
DNV	DNV GL México, S. de R.L. de C.V.
ED	Desconexión de Emergencia
EMC	Compatibilidad Electromagnética
EMU	Unidad Eléctrica Múltiple
EPC	Ingeniería, Abastecimiento y Construcción
EI	Empresa de Estudios Económicos de Ingeniería, S.A. de C.V
EQ	Fuerzas Sísmicas
FAI	Inspección del Primer Artículo
FE	Elemento Finito
FEA	Análisis de Elemento Finito
FGJ	Fiscalía General de Justicia
FN	Carro de Motor

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

Sin comentarios

DNV

FR	Vagones equipados con cabina
GCM	Gobierno de la Ciudad de México
GDF	Gobierno del Distrito Federal
HAZ	Zona afectada por el calor
HC	Hamburg Consult GmbH
IAC	Ingeniería, Asesoría y Consultoría, S.A. de C.V.
ICA	Ingenieros Civiles y Asociados, S.A. de C.V.
IGBT	Transistor Bipolar de Puerta Aislada
ILF	Ilf Beratende Ingenieure A.G.
IM	Impacto y Tolerancia Dinámica
IPISA	Integración de Procesos de Ingeniería, S.A. de C.V.
IPN	Instituto Politécnico N acional
ISRS™	International Safety and Sustainability Rating System (Sistema Internacional de Clasificación de Seguridad y Sustentabilidad)
ISSA	Ingeniería Serivicios y Sistemas Aplicados
LL	Carga viva
L12	Línea 12
LRFD	Carga y Diseño del Factor de Resistencia
LS	Etapas de Carga
LYTSA	Lumbreras y Túneles, S.A. de C.V.
OPEX	Gastos de Operación
PA	Anuncio a Pasajeros
PHMSA	Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (Administración de Seguridad de Tuberías y Materiales Peligrosos)
PIS	Sistema de Información al Pasajero
PMDF	Proyecto Metro del Distrito Federal
PPS	Pago por Servicio
RAMS	Confiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad y Seguridad
ACR	Análisis de Causa de Raíz
S	Viga Sur
SCADA	Control de Supervisión y Adquisición de Datos
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SEAT	Subestación de Energía Eléctrica de Alta Tensión
SGIRPC	Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil
SRSS	Raíz cuadrada de la suma de cuadrados
SSW	Esquina Suroeste
STC	Sistema de Transporte Colectivo
SYSTRA	SYSTRA Group
TCMS	Train Control Management System
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TÜV	Tüv Süd Rail GmbH
UIC	Union Internationale de Chemins de Fer
UNAM	Universidad Autónoma de México
PPS	Pago Por Servicio
Provetren	Provetren, S.A. de C.V.
WSP	Protección de Deslizamiento de Rueda

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

Sin comentarios

Z	Shoe (significado: Cimientos)

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

Sin comentarios

DNV

Definiciones de Términos del Análisis de Causas de Raíz

Término	Definición
Barrera	Características de diseño, sistemas de ingeniería o controles administrativos que previenen las causas o mitigan las consecuencias de una desviación de la operación normal/propósito.
Consecuencia	Un evento o cadena de eventos que resultan de la liberación de un peligro.
Factor Contribuyente	Condiciones o situaciones específicas que degradan la barrera y/o reducen su efectividad.
Barrera Efectiva	Una barrera que se comporta de la forma en la que fue originalmente propuesta.
Evidencia	Datos en los que se basará el equipo de investigación para el subsecuente análisis, pruebas, reconstrucción, corroborsción y conclusiones.
Barrera Fallida	Una barrera que existía originalmente pero que se degrade y ya no funciona como se propuso originalmente.
Causa Inmediata	La causa que precipitó el evento mayor.
Barrera Inefectiva	Una barrera que existe y está en operación, pero cuyo desempeño es insatisfactorio. La barrera puede estarse desempeñando como se propuso originalmente; sin embargo, las condiciones pueden haber cambiado o ser tales que la barrera resulta inefectiva.
Barrera Faltante	Una barrera que nunca existió o que existió en algún momento pero que fue retirada o se volvió obsoleta.
Barrera de Mitigación	Una barrera que se localiza a la derecha del evento mayor (es decir, después del evento) en un Diagrama del Accidente BSCAT™. Una barrera de mitigación reduce la severidad del evento consecuencia. Las barreras de mitigación algunas veces son referidas como "contingencias" o "medidas de recuperación".
Barrera Preventiva	Una barrera que se localiza a la izquierda del evento mayor (es decir, antes del evento mayor) en un Diagrama del Accidente BSCAT™. Una barrera preventiva reduce la probabilidad de ocurrencia de un evento. Las barreras preventivas son referidas algunas veces como "controles."
Causa de Raíz	Factor básico, subyacente o causal en el escenario de un evento que, si se eliminara, se podría haber evitado que ocurriera el evento.
Análisis de Causa de Raíz	Un método de investigación formal que intenta identificar y direccionar las causas de raíz que llevaron a un incidente, accidente o evento. El objetivo de un ACR es documentar los procesos de toma de decisión y todos los factores que contribuyeron al accidente, revisando la evidencia desde el diseño, construcción, operación y mantenimiento del activo y realizando los análisis complementarios que sean necesarios.
Amenaza	Una causa que produce un evento mayor. En un ACR técnico, la amenaza es la causa inmediata.
Evento Mayor	El incidente/accidente que se investiga.

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

Sin comentarios

DNV

1.0 ANTECEDENTES

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; 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 (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).

Como parte del esfuerzo de la Fase 2 del proyecto antes mencionado, DNV identificó las causas inmediatas del Accidente en la L12. Los resultados de los análisis de las causas inmediatas indicaron que el colapso ocurrió como resultado del pandeo de las Vigas Norte y Sur facilitada por la falta de pernos funcionales durante 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 dos vigas paralelas independientes, una viga de concreto (plataforma de concreto) y una viga de acero (vigas 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 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

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

Sin comentarios

para el Diseño de Puentes.1. El reporte Fase 2 del análisis de causas inmediatas se encentra en el Anexo A.

Este reporte detalla los hallazgos del ACR técnico sobre la amenaza de falta de integridad de la estructura elevada compuesta. Se identificaron y evaluaron las barreras entre esta amenaza y el evento mayor, que fue el colapso de la estructura compuesta, utilizando la Técnica para el Análisis Causal Sistemático basada en Barreras (Barrier-based Systematic Causal Analysis Technique (BSCAT™)). Las barreras resumen las causas de raíz técnicas del evento mayor. Las causas de raíz técnicas se definen como factores básicos, subyacentes y causales en un escenario de evento que, si se eliminaran, se podría haber evitado que ocurriera el accidente. Detalles adicionales sobre el enfoque técnico se muestran en la Sección 2.0. A continuación, se muestran detalles adicionales sobre los antecedentes de estructuras compuestas, L12, el Accidente en la L12, y la propiedad de los activos, partes de los cuales se reprodujeron del reporte de la Fase 2.

1.1 Estructuras Compuestas

Para facilitar la discusión sobre las estructuras compuestas y sus componentes asociados, a continuación, se presenta una breve introducción sobre estructuras compuestas con la terminología relevante. La Figura 1 contiene esquemas que representan (a) un ensamble simplificado de las estructuras compuestas de acero y concreto[2] y (b) una ilustración simplificada que muestra la respuesta de una estructura compuesta desacoplada (1) vs. una estructura acoplada (2)[3].

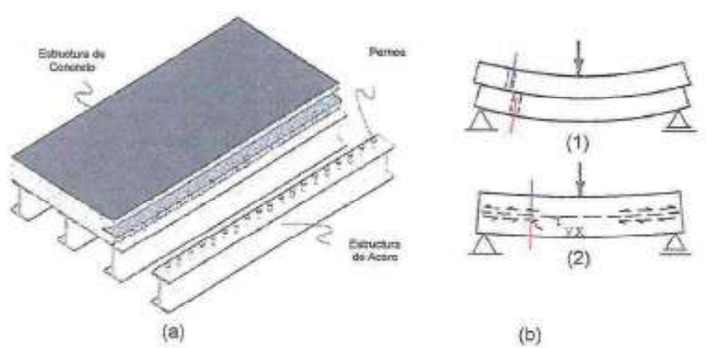


Figura 1 - Representación esquemática de (a) un ensamble simplificado de la estructura compuesta de acero y concreto2 y (b) una ilustración simplificada que muestra la respuesta de una estructura compuesta desacoplada (1) vs una estructura acoplada (2)3.

1 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) LFRD Bridge Design Specifications, SI Units, 4th Edition, 2007.
2 Reproducido de: http://www.steel-bridges.com/composite-beam-bridge.html
3 Reproducido de: Kare Hellan, Makarukk, Trondheim, Norway: Tapir, 1969, p.19.

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

Sin comentarios

no pueden tolerar cargas de tensión o de corte. Si estas estructuras se desacoplan, cada una actuará de forma independiente (ver Figura 1 (b)-(1)).

1.2 L12

La Figura 2 es un mapa del sistema que muestra la L12, "La Línea Dorada". La L12 opera en el sur y sureste de la Ciudad de México, México. La línea de 23.722 km es operada por el Sistema de Transporte Colectivo (STC) y comprende 20 estaciones incluyendo cuatro (4) estaciones de conexión (Mixcoac, Zapata, Ermita, y Atlalilco) y una (1) estación terminal (Tláhuac). Las actividades contractuales de la Línea 12 comenzaron en junio de 2008 y se puso más tarde en funcionamiento el 30 de octubre de 2012 después del periodo de pruebas y ensayos. La línea está formada por una sección de túnel (de la Interestación Mixcoac-Insurgentes Sur a la Interestación Mexicaltzingo-Atlalilco) y una sección elevada (puente elevado) (de la interestación Tlaltenco-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 pretensado (4.5375 km) y
- Vigas de acero unidas a concreto precolado usando pernos para crear una estructura compuesta (6.717 km).

Dichas vigas son el soporte para los sistemas de vías y el material rodante, y son soportadas por una subestructura subyacente que incluye cabezales de concreto y pilares de concreto.

Figura 2 - Mapa del sistema de la L12 (la Línea Dorada), que opera al sur y sureste de la Ciudad de México, México4 El Accidente en la Línea 12 ocurrió entre las Estaciones San Lorenzo Tezonco y Olivos (cuadro punteado en rojo). La escala es en kilómetros.

4 Map from the following URL: https://mapa-metro.com/en/Mexico/Mexico%20City/Mexico%20City-Metro-map.htm

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

Sin comentarios

1.3 Accidente del 3 de mayo de 2021

Aproximadamente a las 22:11 hora local del 3 de mayo de 2021, un tren viajaba al este de la Estación San Lorenzo Tezonco a la Estación Olivos cuando una sección del puente elevado colapsó cuando los dos últimos coches del convoy atravesaban el tramo. El puente elevado en esta ubicación está formado por vigas de acero y concreto precolado. Detalles adicionales sobre el diseño y la construcción se muestran en la Sección 4.1.

La Figura 3 es una fotografía que muestra la ubicación del Accidente en la Línea 12 relacionado con las Estaciones San Lorenzo Tezonco y Olivos; puede verse la ubicación en la Figura 2. El colapso ocurrió aproximadamente a 443 m de la Estación San Lorenzo Tezonco y a 198 m de la Estación Olivos. La Figura 4 es una imagen de Google Earth que muestra la ubicación de las Secciones Este y Oeste que colapsaron en la L12 entre las Columnas 12 y 13 sobrepuesta con el plano "como se construyó" (as-built) de la misma ubicación.[758]. El tramo entre estas columnas es de 30 metros. El colapso de la sección del puente elevado ocurrió inmediatamente al este de donde la vía se reduce de tres vías a dos. La tercera vía se usa intermitentemente como vía de mantenimiento, también conocida como vía apartadero, la cual se utilizó con poca frecuencia, excepto para estacionar trenes que estaban fuera de servicio. La Figura 5 es el plano as-built que muestra los elementos estructurales de acero de las secciones colapsadas en relación con las Columnas 12 y 13. El tramo está formado por dos vigas paralelas (Viga Norte y Viga Sur) que están fabricadas con vigas más pequeñas (subvigas) con variaciones en los espesores del patín inferior. Por ejemplo, la Viga Norte comprende las Subvigas T-3, T-1, T-7, T-7, T-1, y T-3; detalles de cada una se muestran en la Sección 4.2.1.3 del reporte fase 2 (Anexo A). Una tercera viga, la Viga T-6 (T-6), ubicada en el lado oeste del tramo se une con la Viga Norte en el centro del tramo, la cual fue diseñada para brindar soporte adicional a la vía apartadero que comienza en esta ubicación. Las Secciones Este y Oeste separadas aproximadamente en el tramo medio entre la Columna 12 (Estación Número 10+240.444) y la Columna 13 (Estación Número 10+270.457). En los soportes de las columnas este y oeste, diafragmas de acero unen a las Vigas Norte y Sur, así como a la Viga Norte con la Viga T-6. Adicionalmente, cinco (5) marcos transversales de acero se colocaron a lo largo de la longitud del tramo, centrados en el tramo, y con un espaciado de cinco (5) metros.

La Figura 6 contiene imágenes que muestran aproximadamente la misma orientación de vista (es decir, hacia la Estación San Lorenzo Tezonco) de la sección elevada de la vía entre las Columnas 12 y 13 (a) el 18 de mayo de 2021 y (b) en junio de 2019. La fotografía (a) fue tomada por el personal de DNV y la imagen (b) es una imagen de Google Maps. La Sección Oeste estaba tendida en el suelo (no visible en la Figura 6 (a)) y la Sección Este estaba parcialmente soportada por la Columna 12 y el otro extremo se encontraba en contacto con el suelo. Los coches 6 (este) y 7 (oeste) del tren se encontraban en las secciones colapsadas del puente elevado de concreto y cayeron. Como resultado del accidente, hubo 27 decesos, cerca de 100 lesionados y el cierre total de la L12.

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

Sin comentarios

Figura 3 - Fotografía que muestra la ubicación del Accidente en la Línea 12 en relación con la Estaciones San Lorenzo Tezonco y Olivos; consulte la ubicación en la Figura 52. La escala se encuentra en metros.

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

Sin comentarios

DNV

Figura 4- Imagen de Google Earth que muestra la ubicación de la falla, compuesta de las Secciones Este y Oeste que colapsaron en la L12 entre las Columnas 12 y 13, en comparación con el plano as-built de la misma ubicación, consulte la ubicación en la Figura 3. Las unidades en el plano se encuentran en centímetros.5[758]

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

[5] Reproducido del archivo con nombre: 210602 PMDF-12-EST-612155-IV-0018-03400-P-AB.pdf, que contenía un error en el posicionamiento.[758]

Sin comentarios

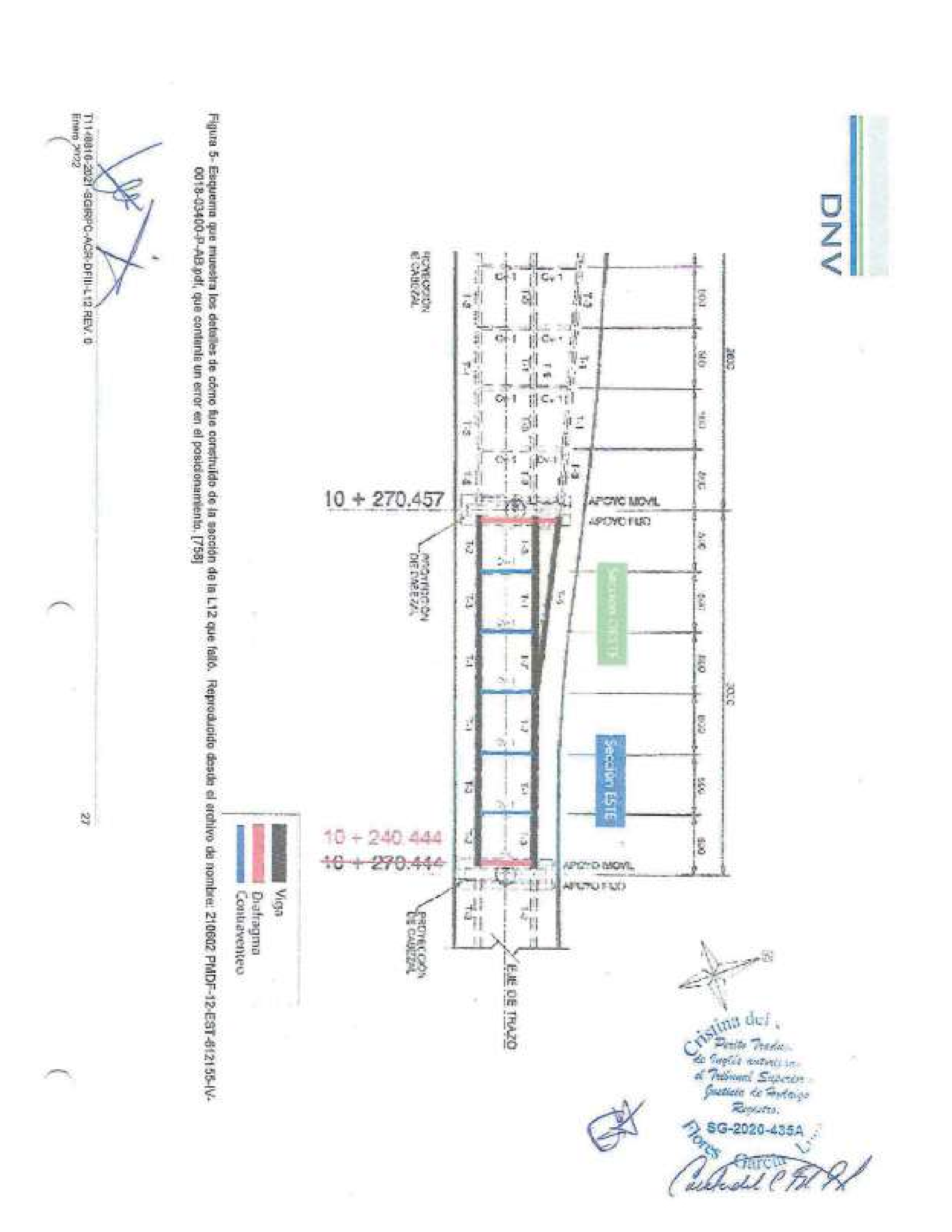


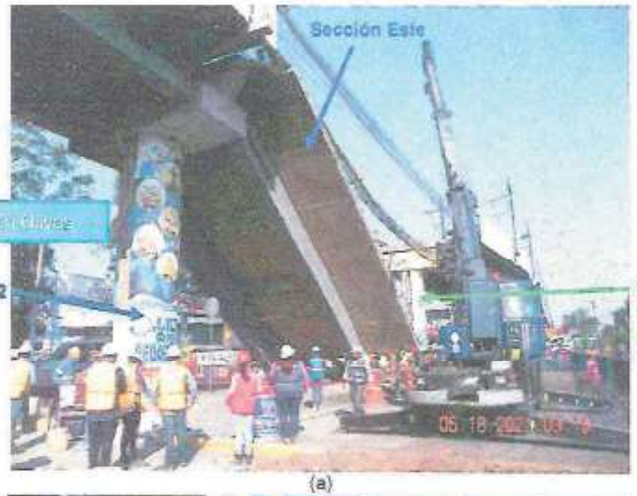
Figura 5- Esquema que muestra los detalles de cómo fue construido de la sección de la L12 que falló. Reproducido desde el archivo de nombre: 210602 PMDF-12-EST-612155-IV-0018-03400-P-AB.pdf, que contenía un error en el posicionamiento. [758]

T11-6816-2021-SGIRPC-ACR-DFIII-L12 REV. 0
Enero 2022

27

Sin comentarios

DNV



(a)

(b)

Figura 6- Imágenes que muestran aproximadamente la misma orientación de vista (es decir, hacia la Estación San Lorenzo Tezonco; Oeste) del puente elevado entre las Columnas 12 y 13 (a) el 18 de mayo de 2021 y (b) en junio de 2019. La fotografía en (a) fue tomada por el personal de DNV y la imagen (b) es una imagen de Google Street View.

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

Sin comentarios

1.4 Contratación

Para facilitar la discusión de la información contenida en el documento del ACR técnico, a continuación, se muestra un resumen de las entidades contratantes y asociadas con el diseño, construcción, operaciones y mantenimiento de la L12. Como la propiedad del activo ha evolucionado con el paso del tiempo, se proporciona la estructura en el momento de la construcción al igual que la estructura actual a agosto de 2021.[5]

1.4.1 Momento de la Construcción

La Figura 7 es un esquema que muestra la estructura del Proyecto de la L12 desde su concepción y hasta la construcción. A continuación, se discuten los detalles de las entidades que se anotan.

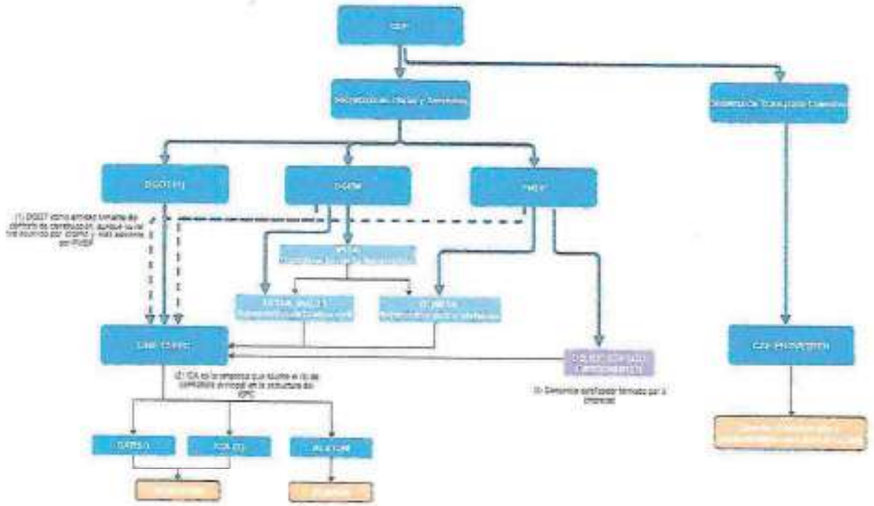


Figura 7- Esquema que muestra la estructura del Proyecto L12 desde su concepción hasta su construcción.

Tras la realización de estudios, análisis, encuestas de opinión y consultas públicas respecto a la L12 entre 2000 y 2007, la empresa Consultoría Metropolitana de Ingeniería S.A. (COMINSA), [1799-1801] una compañía de consultoría y asesoría establecida en México cuyo enfoque se encontraba en la

En la Sección 3.0, se proporciona una línea de tiempo, incluidos los detalles del proceso de contratación.

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

Sin comentarios

DNV

transportación masiva de pasajeros y trenes, fue contratada en 2007 por STC para que reuniera información antes de la construcción.

El Gobierno del Distrito Federal (GDF), actualmente Gobierno de la Ciudad de México (GCM), manejó el proceso de licitación para la construcción de la L12 a través de la Dirección General de Obras para el Transporte (DGOT). La Secretaría de Obras y Servicios emitió una licitación pública internacional para la construcción de la L12 el 21 de enero de 2008. El nombre de la licitación fue, con Número de Referencia 30001140-001-08, *Proyecto Integral a Precio Alzado y tiempo determinado para la construcción de la Línea 12 Tláhuac – Mixcoac del Sistema de Transporte Colectivo, comprendiendo los estudios y análisis necesarios; anteproyectos; Proyectos Ejecutivos; Construcción, Instalaciones Fijas; Pruebas; Marcha en vacío y Puesta en Servicio; Capacitación y Requerimientos del Organismo operador, teniendo como terminación final en las zona de Intertramos y Estaciones Subterráneas hasta el nivel de cajón impermeabilizado.* Ingenieros Civiles y Asociados, S.A de C.V. (ICA), Alstom Mexicana, S.A. de C.V. (Alstom), y Carso Infraestructura y Construcción, S.A.B. de C.V. (Carso) presentaron una propuesta conjunta y les fue otorgado el contrato. Estas tres compañías serán referidas en lo sucesivo como la entidad de Ingeniería, Abastecimiento y Construcción (EPC por sus siglas en inglés, en lo sucesivo referido como Consorcio). El contrato se realizó inicialmente entre DGOT e ICA (la compañía que representaba a la Consorcio) y comprendía dos (2) elementos principales en su alcance:

- Estudios, básicos y detallados, para el proyecto L12 y actividades de construcción (obra de ingeniería civil)
- Sistemas (trabajos electromecánicos).

Cabe señalar que el material rodante (es decir, los convoys) no era parte del contrato entre Consorcio y DGOT. El Gobierno del Distrito Federal creó la Dirección General del Proyecto Metro (DGPM) para facilitar las necesidades del proyecto de la L12 durante la etapa de construcción. El Proyecto Metro del Distrito Federal (PMDF) posteriormente reemplazó a la DGPM. Tanto la DGPM como la PMDF fueron responsabilidad de la Secretaría de Obras y Servicios, posterior a las reformas en el Reglamento Interior de la Administración Pública del Distrito Federal. Se otorgó autonomía administrativa y financiera a Proyecto Metro del Distrito Federal y fue responsable por la construcción, abastecimiento y ampliación de la red STC. A continuación, se resumen las funciones y responsabilidades de DGOT, DGPM, y PMDF en el momento de la construcción de la L12.

La Funciones y Responsabilidades de DGOT en el momento de construcción, incluían:

- Realizar estudios y actividades de investigación tecnológica para optimizar, actualizar y ampliar en México el sistema metro (operado por STC – *Sistema de Transporte Colectivo*), Metrobús, Transportes Eléctricos, Trenes Ligeros y Centros de Intercambio Modal, incluyendo afectaciones laterales y trabajos complementarios, puentes, distribuidores viales, pasos a desnivel, ciclopistas, y tranvías.
- Definir proyectos ejecutivos y detalladas para la construcción de trabajos para ampliar en México el sistema metro, Metrobús, Transportes Eléctricos, Trenes Ligeros y Centros de Intercambio

Cristina del Carmen Flores Garcia Luna
Perito Traductor de Inglés autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo
Registro: SG-2020-436A

T1146816-2021-SG/RPC-ACR-OFII-L12 REV. 0
Enero 2022

Sin comentarios

Modal, incluyendo afectaciones laterales y trabajos complementarios, puentes, distribuidores viales, pasos a desnivel, ciclo pistas, y tranvías.

- Realizar los trabajos asociados con la ampliación en México del sistema Metro, Metrobús, Transportes Eléctricos, Trenes Ligeros, y Centros de Intercambio Modal, incluyendo afectaciones laterales y trabajos complementarios, puentes, distribuidores viales, pasos a desnivel, ciclo pistas, y tranvías.
- Adquirir los materiales y el equipo requeridos para el funcionamiento adecuados en México del Sistema Metro, Metrobús, Transportes Eléctricos, Trenes Ligeros, y Centros de Intercambio Modal, incluyendo afectaciones laterales y trabajos complementarios, puentes, distribuidores viales, pasos a desnivel, ciclo pistas y tranvías.
- Verificar que las obras de ingeniería civil y los trabajos electromecánicos en México del Sistema Metro, Metrobús, Transportes Eléctricos, Trenes Ligeros, y Centros de Intercambio Modal, incluyendo afectaciones laterales y trabajos complementarios, puentes, distribuidores viales, pasos a desnivel, ciclo pistas, y tranvías fueran realizados de conformidad con el programa autorizado y en cumplimiento con los proyectos ejecutivos y detallados.
- Entregar a los actores relevantes (delegaciones, unidades administrativas, organismos autónomos y entidades operativas) las ampliaciones de la red del metro, Metrobús, Transportes Eléctricos, Trenes Ligeros, y Centros de Intercambio Modal, incluyendo afectaciones laterales y trabajos complementarios, puentes, distribuidores viales, pasos a desnivel, ciclo pistas, y tranvías.
- Promover y realizar trabajos de infraestructura para el desarrollo de áreas destinadas a ser ciclo pistas.

Las Funciones y Responsabilidades de DGPM (actualmente este organismo ya no existe) en el momento de la construcción incluían:

- Acordar con el siguiente nivel de jerarquía asuntos relacionados con los trabajos de ampliación de la red del metro en México.
- Planear, programar y presupuestar el proyecto estratégico bajo su competencia.
- Realizar, en coordinación con STC, estudios y actividades de investigación que se requirieran para la ampliación de la red del metro.
- Coordinar con STC la ejecución de proyectos, actividades de construcción e implementación de equipo que se requirieran para los trabajos de ampliación de la red.
- Definir proyectos de ingeniería ejecutivos y detallados para la ampliación del STC, incluyendo afectaciones laterales y trabajos complementarios.

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

Sin comentarios

- Coordinar la elaboración de especificaciones para licitaciones, términos de referencia, modelo de contratos y otros documentos que se requirieran para el otorgamiento de los trabajos de ampliación de la red del metro.
- Definir los contratos y acuerdos que se requirieran para la ampliación de la red del metro en coordinación con el STC.
- Establecer mecanismos de control para asegurar la seguridad en recursos humanos y materiales durante el desarrollo de los trabajos.
- Construir y supervisar los trabajos de ampliación de la red del metro, así como aquellos trabajos originados por sus afectaciones.
- Verificar que las obras de ingeniería civil y los trabajos electromecánicos de la ampliación de la red del metro se realizaran de conformidad con el programa autorizado y en cumplimiento con los proyectos ejecutivos.
- Coordinar con otros actores (delegaciones, unidades administrativas, organismos autónomos y otros organismos que pertenecen a la Administración Pública) los trabajos de ampliación de la red.
- Abastecimiento de materiales y equipo fijo que se requiriera por las afectaciones laterales y trabajos complementarios.
- Entregar las ampliaciones de la red del metro, incluyendo afectaciones laterales y trabajos complementarios al STC y a otros actores (delegaciones, unidades administrativas, organismos autónomos y entidades operativas).
- Verificar el uso apropiado e implementación del *Manual de Aplicaciones de Señales Informativas* antes, durante y después de la ejecución de trabajos de su competencia.
- Funciones y responsabilidades adicionales según se definían explícitamente en las leyes y regulación, así como aquellas que otorgaban entidades de mayor nivel.

Las Funciones y Responsabilidades del PMDF (actualmente este organismo ya no existe) en el momento de la construcción incluían:

- Planeación, programación, presupuestación, y ejecución de proyectos estratégicos de su competencia.
- Realizar, junto con el STC, estudios y actividades de investigación que fueran necesarios para la ampliación de la red del metro.
- Coordinar con el STC la ejecución de proyectos, actividades de construcción e implementación de equipo que se requiriere para los trabajos de ampliación de la red.
- Desarrollar proyectos de ingeniería detallada para la ampliación del STC, incluyendo afectaciones laterales y trabajos complementarios.

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

Sin comentarios

- Realizar la adjudicación de proyectos, ejecución de contratos y adquisiciones que se requirieran para la construcción e implementación de equipo para atender las necesidades para la ampliación de la red del metro.
- Construir y supervisar los trabajos de ampliación del metro y de instalaciones fijas, incluyendo afectaciones laterales y trabajos complementarios, asegurando que se realizaran en cumplimiento con los programas y presupuestos existentes para los proyectos.
- Adquirir, transportar y abastecer materiales y equipos que se requirieran para las ampliaciones del STC.
- Entregar la ampliación de la red del metro, incluyendo afectaciones laterales y trabajos complementarios al STC y otros actores (delegaciones, unidades administrativas, organismos autónomos, y entidades operativas).
- Realizar las pruebas y verificaciones necesarias antes de poner en funcionamiento las ampliaciones del STC, garantizando así la integridad del servicio.

Lo anterior muestra que DGOT, DGPM y PMDF tenían responsabilidades similares en relación con el STC, como la construcción, supervisión, verificación y entrega de los activos relacionados con las redes ferroviarias al STC. Como diferencia, la competencia de DGOT también incluía modos adicionales de transporte (como Metrobús, transportes eléctricos, Trenes Ligeros, y Centros de Intercambio Modal), mientras que DGPM y PMDF se enfocaban en el Sistema Masivo Metro.

Para ejecutar sus responsabilidades relacionadas con la construcción de la L12, el PMDF celebró diversos contratos con universidades y compañías, incluyendo a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto Politécnico Nacional (IPN) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Dichas entidades brindaron servicios de asesoría cuando se les solicitó.

La supervisión de la construcción se dividió en tres (3) contratos:

- Contrato 1 – La supervisión de las obras de ingeniería civil fue realizada por las siguientes entidades (donde DGPM actuó como la entidad contratante):
  - Lumbreras y Túneles, S.A. de C.V. (LYTSA)
  - Ingeniería, Asesoría Y Consultoría, S.A. de C.V. (IAC)
  - Empresa de Estudios Económicos de Ingeniería, S.A. de C.V. (EI)
- Contrato 2 – La supervisión de los sistemas fue realizada por las siguientes entidades (donde PMDF actuó como la entidad contratante):
  - Consultoría Integral en Ingeniería, S.A. de C.V. (CONIISA)
- Contrato 3 – El control y Coordinación de los dos (2) contratos anteriores fue realizado por las siguientes entidades (donde DGPM actuó como la entidad contratante):

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

Sin comentarios

- Integración de Procesos de Ingeniería, S.A. de C.V. (IPISA)

Conforme a la documentación proporcionada a DNV, la certificación de las obras de ingeniería civil no se realizó, como se suele hacer de acuerdo a las mejores prácticas de la industria. Sin embargo, como se indicó anteriormente, la supervisión de las obras de ingeniería civil fue realizada por diversas entidades. La documentación relacionada con la debida diligencia en ingeniería de estas entidades supervisoras no fue proporcionada a DNV cuando la solicitó o no existe.

La certificación de los sistemas electromecánicos fue realizada por una empresa conjunta internacional formada por DB International GmbH (DB), ILF Beratende Ingenieure A.G. (ILF), Tüv Süd Rail GmbH (TÜV) y Hamburg Consult GmbH (HC). El alcance de la certificación de los sistemas electromecánicos incluyó:

- Sistemas de señalización
- Sistema de conducción autónomo
- Sistema centralizado de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA)
- Sistema de energía de alto voltaje, incluyendo:
    - Subestación de tracción eléctrica de alto voltaje (también conocida como subestación de energía eléctrica de alta tensión [SEAT])
    - Estaciones rectificadoras de tracción
    - Distribución de energía por tracción
    - Línea aérea
- Sistema de telefonía del tren
- Sistema de telefonía directa y automática
- Integración del sistema
- Sistema de vías

El material rodante necesario para la operación de la L12 fue arrendado por el STC mediante un arrendamiento a largo plazo de Pago Por Servicio (PPS), en lugar de comprarlo. El PPS se define como un acto jurídico en el que se involucran los recursos monetarios de varios ejercicios financieros, sujeto a la correcta entrega de un servicio. Dicho acto es celebrado entre un organismo autónomo y un proveedor, siendo el ultimo responsable por el abastecimiento a largo plazo (involucrando sus propios activos o los de un tercero) de conformidad con los requerimientos aplicables de calidad; mientras que el primero es responsable de cumplir con las cantidades monetarias en pago por los servicios prestados. El STC realiza pagos mensuales por el arrendamiento, con descuentos y penalidades potenciales si ciertas metas especificas no se cumplian (confiabilidad, afectación del servicio, disponibilidad, y cumplimiento con los programas de mantenimiento). Esta fue la primera vez en la historia que el STC optó por este tipo de

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

Sin comentarios

acuerdo para el Sistema Metro. Antes de celebrar el contrato, el STC realizó análisis para determinar el proceso idóneo para la adquisición (compra estándar vs. PPS) y para evaluar la tecnología de material rodante idónea (llantas de caucho o llantas de acero).

El STC recibió diversas propuestas PPS de diferentes proveedores, y se otorgó el PPS a CAF México S.A. de C.V. (CAF). El alcance del PPS incluyó el diseño, abastecimiento, arrendamiento a largo plazo, y mantenimiento de 30 convoys con llantas de acero. El periodo del arrendamiento fue entre 2010 y 2026. Se formó un consorcio entre CAF y Provetren, S.A. de C.V. (Provetren) para manejar el contrato asociado con el arrendamiento. Provetren es responsable de:

- Diseño básico y detallado de los convoys,
- Construcción de los convoys,
- Mantenimiento preventivo y correctivo durante toda la duración del contrato, y
- Transferencia de tecnología a la terminación del contrato.

DNV no tuvo conocimiento de certificaciones o actividades de supervisión durante el diseño y construcción por partes que no fueran el STC.

1.4.2 Estructura Actual

La operación y mantenimiento de los sistemas y obras de ingeniería civil para la L12 se convirtieron en la responsabilidad del STC al terminar la construcción en Octubre de 2012. En la estructura actual del GCM hay dieciocho (18) Secretarías y veintiocho (28) entidades públicas descentralizadas, siendo STC una de estas últimas.[7,8] Obsérvese que el arrendamiento PPS aún está vigente entre el STC y el consorcio formado por CAF y Provetren hasta 2026. El STC es un organismo público descentralizado creado en 1987, con los siguientes objetivo, misión y visión:

- Objetivo: operación de un tren rápido, impulsado por energía eléctrica y que cuenta con secciones subterráneas, superficiales y elevadas, y que tiene el propósito de brindar movilidad a los usuarios de la CDMX y del área metropolitana del Valle de México.
- Misión: ofrecer un servicio confiable, seguro, tecnológicamente limpio, de transporte público masivo con una tarifa accesible que pueda satisfacer las expectativas de calidad, accesibilidad, frecuencia y cobertura de los usuarios y que se pueda desempeñar con la transparencia, equidad y eficiencia de un Sistema Metro de clase mundial.
- Visión: lograr un servicio de transporte de excelencia, que contribuya al logro del objetivo de tener un transporte sustentable en el Área Metropolitana del Valle de México, con un alto grado de avance tecnológico nacional, cultura, vocación industrial y servicio a favor del interés general y que mejore la calidad de vida de los ciudadanos.

7 Sitio web de referencia: https://www.metro.cdmx.gob.mx/organismo/acerca-de
8 https://www.cdmx.gob.mx/

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

Sin comentarios

DNV

2.0 ENFOQUE TÉCNICO

El objetivo del ACR técnico fue documentar los procesos de toma de decisiones y todos los factores que contribuyeron al Accidente en la L12. En un ACR técnico se revisan los registros históricos desde el diseño, construcción, operación y mantenimiento de un Metro en el área afectada para identificar las causas de raíz del accidente. Las causas de raíz técnicas se definen como factores básicos, subyacentes y causales, en un escenario de eventos que, si hubieran sido eliminados habrían prevenido la ocurrencia del accidente. Este reporte detalla los hallazgos del esfuerzo del ACR técnico en relación con el Accidente en la L12, y ofrece recomendaciones para remediar las causas de raíz técnicas que fueron identificadas.

El ACR técnico se enfocó en el segmento de la L12 entre las Columnas 12 y 13 (en lo sucesivo referido como la "ubicación del accidente"). Las conclusiones y recomendaciones de este ACR técnico se basan en los hallazgos de una investigación de causas inmediatas del accidente realizada por DNV, en análisis complementarios realizados por DNV, y en información obtenida durante el ACR técnico. En el Anexo B se hace referencia a la información obtenida para el ACR técnico.

Los documentos adquiridos, entrevistas y análisis complementarios fueron utilizados para realizar las siguientes tareas:

- Creación de la línea de tiempo de los eventos que llevaron al accidente
- Determinación de causa(s) de raíz del accidente usando la Técnica para el Análisis Causal Sistemático basada en Barreras (Barrier-based Systematic Causal Analysis Technique (BSCAT™))

Es importante observar que los análisis descritos en este reporte sólo se realizaron para la porción de la L12 que se localiza entre las Columnas 12 y 13. Los hallazgos y la discusión presentados en este reporte se enfocan en el segmento de la línea antes mencionados, pero las recomendaciones pueden aplicar a las otras ubicaciones de la L12. DNV se reserva el derecho de modificar o complementar los resultados aquí presentados en caso de que surja nueva información y/o hallazgos.

2.1 Metodología de la Técnica para el Análisis Causal Sistemático basada en Barreras (Barrier-based Systematic Causal Analysis Technique)

El análisis causal es el núcleo de cualquier investigación de incidentes o accidentes. El análisis usa un método sistemático para procesar la evidencia reunida durante una investigación e identificar los factores que llevaron al accidente. El análisis comienza con el accidente y camina en retroceso hacia la causa(s) de raíz. Este enfoque asiste en el desarrollo de medidas correctivas y/o remediales.

DNV usó la BSCAT™ para investigar el Accidente en la L12. BSCAT™ es una metodología que permite el análisis de incidentes complejos a través de la evaluación de las barreras para el accidente. Con frecuencia se utiliza un diagrama bowtie simplificado en BSCAT™ para identificar las barreras que debieron haber existido para evitar la amenaza que ocasionó directamente el accidente (es decir, la causa inmediata de la falla) y las barreras que hubo o debió haber habido en el sitio para mitigar las consecuencias posteriores al accidente. Para esta investigación se identificaron y evaluaron las barreras

Cristina del Carmen Flores García Luna
Perito traductor autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo
Registro: SG-2020-4358

Sin comentarios

preventivas y mitigantes. Una vez que se identificaron las barreras, se aplicó un análisis causal sistemático a cada barrera utilizando la metodología BSCAT™ para evaluar la efectividad de las barreras individuales. Usando las barreras identificadas, se determinó la causa(s) de raíz técnica del accidente.

El proceso BSCAT™ involucró los siguientes pasos:

1. **Captura de Evidencia** – Esto involucró la recolección de información perteneciente al accidente mediante la realización de entrevistas, revisión de fotografías del sitio de la falla, y revisión de documentos y datos relacionados con el accidente. La evidencia capturada se resume en la Sección 2.2.
2. **Desarrollo de la Línea de Tiempo** – La evidencia capturada se utilizó para crear una línea de tiempo con los eventos que llevaron al accidente y los que le siguieron. Las líneas de tiempo desarrolladas para el Accidente en la L12 se muestran en la Sección 3.0.
3. **Identificación de Barreras** – Se creó un diagrama BSCAT™ del accidente estableciendo las barreras entre la amenaza y el accidente y entre el accidente y la consecuencia. Las barreras que se encontraban o no se encontraban en el sitio para evitar el accidente fueron identificadas y evaluadas.
4. **Estado de la Barrera** – Se determinó el estado de cada barrera. Las descripciones del estatus de las barreras incluyen Efectiva, Inefectiva, Fallida y Faltante. El término "Efectiva" se usa para describir una barrera que se desempeña de la forma originalmente propuesta. "Inefectiva" es un término que se usa para describir una barrera que existe y opera, pero cuyo desempeño es insatisfactorio. El término "Fallida" se usa para describir una barrera que existió originalmente pero que se degradó y ya no funciona como se propuso originalmente. "Faltante" es un término que se usa para describir una barrera que nunca existió o que en algún momento existió pero que fue removida o se volvió obsoleta.
5. **Análisis Causal** – Las barreras Efectivas, Inefectivas, Fallidas, o Faltantes se evaluaron entonces para identificar condiciones o situaciones específicas que degradaron las barreras y/o redujeron su efectividad. Dichas condiciones o acciones son referidas como factores contribuyentes. Las barreras evaluadas para el Accidente en la L12 se resumen en la Sección 4.0.

2.2 Captura de Evidencia

La fase de captura de evidencia de un ACR técnico está formada por entrevista al personal clave respecto al ciclo de vida de la L12 (diseño, construcción, operaciones y mantenimiento), investigaciones en el sitio, y revisión de documentos. El propósito de capturar la evidencia es establecer una línea del tiempo de los eventos y facilitar la identificación de las causas de raíz subyacentes.

2.2.1 Entrevistas con el Personal Clave

Además de la revisión de los documentos, DNV solicitó entrevistas con el personal clave para capturar información adicional relacionada con el diseño, construcción, operación y mantenimiento. Las entrevistas fueron solicitadas a través de oficios a la SGIRPC, los cuales fueron entregados el 7 de enero ...

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

Sin comentarios

correspondiente. La aceptación de la solicitud fue entregada a la SGIRPC, quien comunicó los resultados a DNV. Todos los documentos anotados en las entrevistas fueron solicitados siguiendo el proceso que se señala en la Sección 2.2.2.

En la Tabla 1 se muestra una lista de las entrevistas realizadas por DNV. Las entrevistas fueron realizadas a doce (12) trabajadores del STC, dos (2) trabajadores de PMDF y a un (1) trabajador de Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF). La fecha de la solicitud de la entrevista por parte de DNV se muestra en la última columna de la tabla. Los entrevistados recibieron un programa y un cuestionario general por anticipado. Todas las entrevistas se realizaron en las instalaciones del STC con la asistencia de representantes del SGIRPC.

Tabla 1- Resumen de los departamento en los que DNV entrevistó a personal clave.

Número de Identificación	Departamento	Compañía	Fecha de la Solicitud
I-1	Ingeniería y Desarrollo	STC	18/05/2021
I-2	Sistemas de Gestión e Investigación de Accidentes	STC	18/05/2021
I-3	Instalaciones Fijas	STC	18/05/2021
I-4	Mantenimiento	STC	18/05/2021
I-5	Mantenimiento de Material Rodante	STC	18/05/2021
I-6	Instalaciones fijas y vías	STC	31/05/2021
I-7	Coordinación de vías	STC	31/05/2021
I-8	Seguridad Institucional	STC	31/05/2021
I-9	Representante técnico	CAF	31/05/2021
I-10	Operador	STC	31/05/2021
I-11	Regulador de PCC	STC	31/05/2021
I-12	Jefe de estación	STC	31/05/2021
I-13	Jefe de estación	STC	31/05/2021
I-14	Subdirector Obra Civil C (durante la construcción)	PMDF	23/07/2021
I-15	Residente de obra (durante la construcción)	PMDF	23/07/2021

Una lista de las entrevistas solicitadas por DNV que no fueron realizadas se muestra en la Tabla 2. Las entrevistas fueron solicitadas a las entidades asociadas con el consorcio y contratistas relevantes. Dichas solicitudes no tuvieron respuesta.

Número de Identificación	Puesto	Compañía	Fecha de la Solicitud
I-16	Director responsable de Obra	Consorcio	18/05/2021
I-17	Perito	Consorcio	18/05/2021
I-18	Residente de obra	OCE-Obras Civiles y Estructuras, S.A. de C.V.	05/08/2021
I-19	Superintendente de obra	OCE-Obras Civiles y Estructuras, S.A. de C.V.	05/08/2021
I-20	Superintendente técnico	OCE-Obras Civiles y Estructuras, S.A. de C.V.	05/08/2021

Tabla 2- Resumen del personal que se solicitó ser entrevistado por DNV, pero que no lo fue.

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

Sin comentarios

Cuando fue relevante, la información obtenida de las entrevistas se referenció usando los números de identificación de la columna de la izquierda de la Tabla 1.

2.2.2 Investigaciones in situ

DNV realizó investigaciones in situ para reunir evidencia asociada con el accidente de la L12. A continuación se resumen las fechas y actividades asociadas con las visitas al sitio:

- El 04 de mayo de 2021 un equipo de expertos de DNV se trasladó al sitio del incidente para documentar en fotos, evidencia de la sección colapsada de la L12 entre las estaciones Olivos y San Lorenzo Tezonco a efectos de contar con información que permitiera identificar las necesidades del proyecto y con ello dimensionar la cotización solicitada.
- El 19 de mayo de 2021, un equipo de expertos de DNV se trasladó al sitio del accidente para atestiguar las actividades realizadas, documentar en fotos la evidencia de la sección colapsada de la L12 entre las esteciones de Olivos y San Lorenzo Tezonco, realizar la inspección visual de la vía y de los componentes al lado de la vía (sistemas de rieles) en las interestaciones San Lorenzo Tezonco – Olivos y San Lorenzo Tezonco a Periférico Oriente. Posteriormente, se realizó una visita al depósito de Tláhuac para realizar una inspección visual de los coches del convoy afectado.

El 19 de mayo de 2021, los expertos de DNV identificaron ubicaciones de muestras que se retirarían de los componentes de concreto de la sección colapsada de la L12 durante la visita al lugar del incidente. Se obtuvieron muestras de concreto de las ubicaciones seleccionadas entre el 19 de mayo y el 25 de mayo de 2021.

- El 8 de junio de 2021, expertos de DNV visitaron el almacén de Tláhuac para identificar las muestras que se tomarían de los miembros estructurales de acero. Todas las actividades fueron observadas y documentadas por representantes de la Fiscalía General de Justicia (FGJ).

2.2.3 Revisión de documentos

DNV revisó los diversos documentos obtenidos con información relacionada con el diseño, construcción, mantenimiento y operación de la L12 (es decir, documentos técnicos, manuales, mapas y datos). La Figura 8 es un esquema que muestra el proceso de solicitud de información para el análisis de causas inmediatas y el ACR técnico realizados por DNV. DNV solicita directamente la información a la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil (SGIRPC), quien a su vez solicita la información al Sistema de Transporte Colectivo (STC) y a la Dirección General de Obras para el Transporte (DGOT). La información fue recuperada de los archivos y entregada a SGIRPC, que a su vez entregó la información a DNV. En el Anexo B se muestra una lista completa de los materiales revisados para el ACR técnico. Las solicitudes de documentos que hizo DNV a SGIRPC también se muestran en el Anexo C.

Cristina del Carmen Flores García
Perito Traductor de Inglés autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo
Registro: SG-2020-436A

Sin comentarios

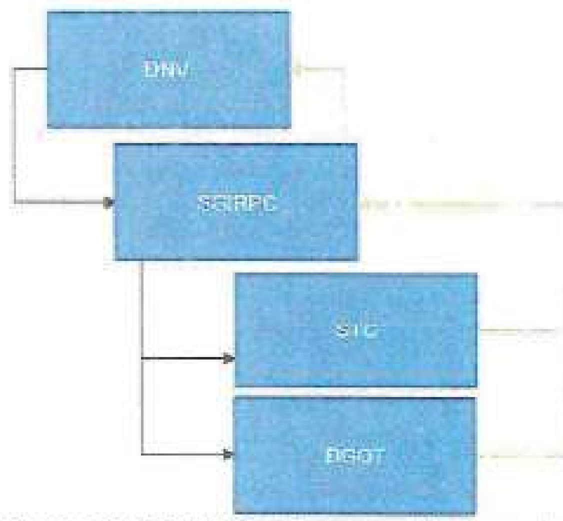


Figura 8- Esquema que muestra el proceso de solicitud de información para el análisis de causas inmediatas y para el ACR técnico realizados por DNV.

Los documentos recibidos se agruparon en las categorías que se listan a continuación. Se anotan los números de referencia de los documentos revisados de cada categoría:

- Documentos Relacionados con el Accidente: [1]-[49]
- Documentos de la Investigación de Causas Inmediatas: [50]
- Diseño: [51]-[495]
- Construcción: [496]-[897]
    - Investigaciones Geotécnicas: [884]-[897]
- Mantenimiento: [868]-[1638]
    - Evaluaciones del Temblor [1562]-[1666]
- Operaciones: [1669] – [1820]

Los documentos proporcionados fueron extensos. Todos los documentos se revisaron con un alto nivel de pertinencia respecto a la Investigación del Accidente en la L12. Para facilitar un proceso oportuno de revisión, se dio prioridad a los documentos relevantes respecto a las Columnas 12 y 13.

2.2.4 Análisis Complementarios

2.2.4.1 Análisis Detallados de Elementos Finitos del Puente elevado Colapsado

Para complementar los análisis estructurales realizados como parte del análisis de causas inmediatas, se realizó un modelo de análisis de elementos finitos (FEA) del puente elevado colapsado. Los siguientes escenarios fueron investigados usando el FEA:

SG-2020-435A
Flores García Luna

Sin comentarios

- Modelo 1 – La condición como se diseñó, incorporando el número correcto y la ubicación de los pernos, así como las propiedades mecánicas especificadas de cada componente conforme a estándares apropiados.
- Modelo 2 – Análisis de la etapa de colapso 1 (ACS-1). La condición de construcción, que incorpora el número observado de pernos. El modelo está destinado a mostrar que el rendimiento del perno en toda la longitud de la viga depende en gran medida de la capacidad de solo unos pocos pernos que soporten un alto esfuerzo.
- Modelo 3 – Análisis de la etapa de colapso 2 (ACS-2). El análisis refleja la situación en la que han fallado 20 metros de pernos (medidos desde el soporte oeste). Sin embargo, la primera fila de pernos se deja intacta y se consideran con una resistencia infinita. Este modelo está destinado a reflejar la importancia de una acción compuesta nivelada (es decir, el concreto todavía está restringiendo el extremo de la viga de acero) a la capacidad de carga total del viaducto.
- Modelo 4 - Análisis de la etapa de colapso 3 (ACS-3). Un escenario similar al ACS-2, pero con la primera fila de pernos también eliminados. Este modelo describe el comportamiento y el colapso del viaducto en un escenario que está de acuerdo con las observaciones realizadas por DNV post-accidente.

Estos escenarios se resumen en las Secciones 3.3 y 3.4 respectivamente. La construcción del modelo a detalle se incluye en el Anexo D.

3.0 RESUMEN DE ACTIVIDADES REALIZADAS POR DNV

3.1 Hallazgos de las Entrevistas al Personal Clave

Como se señaló en la Sección 2.2.1, se realizaron entrevistas con personal clave. Se realizaron quince (15) entrevistas, doce (12) entrevistas con STC, dos entrevistas con personal de PMDF y una (1) entrevista con personal de CAF. El personal de DNV tomó notas detalladas durante las entrevistas. Las entrevistas se utilizaron para identificar lo siguiente:

- Posible falta de controles que se investigarán más a fondo durante la ARC.
- Recomendaciones para transformar la falta de control en un nuevo control operacional, control administrativo o control de ingeniería.
- Documentos potenciales que la DNV debería solicitar como parte de la investigación, como manuales, procedimientos, registros, etc.
- Partes interesadas que deben ser entrevistadas y que pueden proporcionar más información relacionada con el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento.
- Existencia de un sistema de gestión para abordar temas de confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS).

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

Sin comentarios

A través de las entrevistas se identificó la estructura del proyecto L12 para cada una de las etapas del proyecto. Todos estos resultados fueron considerados y utilizados para obtener los hallazgos presentados en este informe.

3.1.1 Observaciones sobre los Sistemas de Rieles

Un experto en Vías Ferroviarias de DNV con especialización en sistemas de información, material rodante, seguridad, y señalización, visitó el sitio del accidente y el Depósito de Tláhuac para observar las condiciones in situ, recolectar evidencia fotográfica, evaluar el material rodante y los sistemas de rieles. La Tabla 3 contiene un resumen de observaciones sobre el sistema de rieles realizadas durante las visitas al sitio. Las imágenes detalladas y fotografías que dan soporte a dichas observaciones se encuentran en la Sección 3.1.1 del reporte de la Fase 2 (ver anexo A). Resultados significativos que serán discutidos más adelante en el ACR técnico incluyen:

- La condición de los elementos de la vía es generalmente buena.
- Los componentes a los lados de la vía, como cajas de control e interruptores de motor también se encontraron en buenas condiciones.
- En el Vagón 7, el interior y el equipo del bastidor inferior, incluyendo el bastidor del bogie y sus componentes, mostraron daños resultantes derivados del colapso.

Tabla 3- Resumen de observaciones de los sistemas de vías realizadas durante las visitas en sitio

Ubicación	Hallazgos
Interestación Sección San Lorenzo Tezonco → Olivos	• Se observó que las condiciones de los elementos de la vía (riel, sujetadores, durmientes) es buena. • La superficie del riel no presenta defectos mayores, con 1 sola ubicación que presenta evidencia de resquebrajamiento. • La geometría de la pista parece apta para su funcionamiento. • Se utilizan traviesas de madera para interruptores y desvíos, de acuerdo con las condiciones de diseño. • Los elementos del lado de la vía que se inspeccionaron (cajas de control e interruptores de motor) se mantienen en buenas condiciones. • Se observó que algunas rocas de balasto mostraban una apariencia redondeada, lo que no es deseable.
Interestación Sección Olivos → San Lorenzo Tezonco	• En general, la vía y los elementos al lado de la vía se encontraron en buenas condiciones. • La sección de vías más cercana al acceso/egreso a los Olivos muestra componentes de la vía dañados, probablemente debido al accidente (posterior al retiro del boje descarrilado del vagón 5).

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

Sin comentarios

Depósito Tláhuac

- El Vagón 6 del convoy afectado "Ciudad de México" no estuvo disponible para su inspección visual.
- El Vagón 7 mostró daños exteriores en la pasarela inter-vagón, equipo del bastidor inferior, bastidor del boje y sus componentes.
- El interior del vagón 7 mostró daños en las manijas. El interior de la pasarela también estaba dañado como resultado del impacto y de la compresión resultante en la estructura.

3.1.2 Observaciones Estructurales

Especialistas de DNV en Ingeniería Civil e Investigación de Fallas/Metalurgia visitaron el sitio del accidente para observar las condiciones en el sitio, recolectar evidencia fotográfica, evaluar las áreas de afectación estructural o geotécnica, así como para confirmar las ubicaciones de donde se obtendrían las muestras de concreto para las pruebas de laboratorio. La Tabla 4 contiene un resumen de las observaciones sobre los miembros estructurales de acero realizadas durante las visitas al sitio. Las imágenes detalladas y las fotografías que dan soporte a estas observaciones se localizan en la Sección 3.1.2 del reporte de la Fase 2 (ver Anexo A). Los resultados significativos que se discutirán más Adelante en el ACR técnico incluyen:

- Los pernos estaban deficientemente soldados a las vigas, resultando en no conformidades contra los estándares de diseño. Adicionalmente, los ferrules de cerámica que se usan para facilitar el proceso de soldadura se dejaron en el sitio, impidiendo cualquier inspección visual para evaluar la calidad de las soldaduras.
- Las ubicaciones y las distribuciones de los pernos no cumplían con el diseño, y las ubicaciones en el concreto precolado no estaban alineados con las vigas, lo que indica un cambio en el diseño de las vigas o del concreto precolado[9]. Para las vigas Norte y Sur, la sección oeste y una porción de la sección este (~16 m de longitud) se identificó que aproximadamente el 70% de los pernos habían sido instalados, mientras que para T6 se habían instalado aproximadamente el 29% de los pernos.
- Deflexión en la Viga Norte de por lo menos 3 pulgadas (7.6 cm) que se identificó en el histórico de imágenes de diciembre de 2019.
- Deformación de los patines superiores de las Vigas Norte, Sur, y T-6 que fue identificada después del accidente.
- Deformación del atiesador de la Viga Norte, identificado primero en el histórico de imágenes de enero de 2017.
- El marco transversal central mostró una visible deflexión hacia la Columna 12 que se identificó en el histórico de imágenes de 2020.
- Se identificó la progresión de la mancha de humedad y de eflorescencia en el lado inferior de la estructura de concreto precolado por primera vez en el histórico de imágenes de 2015.

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

9 No se identificó documentación que aclarara cuando se hizo el diseño a las vigas o al concreto precolado.

Sin comentarios

Tabla 4- Resumen de observaciones sobre los miembros estructurales de acero.

Miembro Estructural		Sección Oeste	Sección Este
Viga Sur	•	• El patín superior no estaba fracturado, pero mostraba deformación hacia la superficie interior. • El patín inferior estaba intacto sin evidencia de deformación. • El alma estaba fracturada (sobre carga de corte) en la unión con el patín inferior. • Los marcos transversales mostraron fracturas por sobrecarga en diversas ubicaciones del refuerzo vertical. • Todos los pernos estaban fracturados.	• El patín superior no estaba fracturado, pero mostraba deformación hacia la superficie exterior. • El patín inferior estaba intacto sin evidencia de deformación. • El marco transversal central mostró fracturas por sobrecarga en la vertical. El resto de los marcos transversales estaban intactos. • Todos los pernos estaban fracturados, excepto los 7-8 metros cercanos a la columna este.
Viga Norte	•	• El patín superior no estaba fracturado, pero mostraba deformaciones hacia la superficie interna. • El patín inferior estaba intacto, sin evidencia de deformación. • El alma estaba fracturada (sobrecarga de corte) en la unión con el patín inferior. • Los marcos transversales mostraban fracturas por sobrecarga en varias ubicaciones del refuerzo vertical. • Todos los pernos estaban fracturados	• El patín superior no estaba fracturado, pero mostraba deformaciones hacia la superficie externa. • El patín inferior estaba intacto, sin evidencia de deformación. • El marco transversal central mostraba una grieta por fatiga. El resto de los marcos transversales estaban intactos. • Todos los pernos estaban fracturados, excepto los 7-8 metros cercanos a la columna este.
Viga T-6	•	• El patín superior no estaba fracturado, pero mostraba deformaciones hacia la superficie externa. • El patín inferior estaba intacto, sin evidencia de deformación. • Una grieta por fatiga de 8.9 cm de largo se localizó en el alma en la base del patín inferior que sufre una transición hacia una grieta por sobrecarga que atraviesa casi toda la altura del alma. • Todos los pernos estaban fracturados	• No aplica; T-6 termina en la Sección Oeste.
Diafragmas	•	• El diafragma entre las Vigas Norte y Sur estaba intacto • El diafragma entre las Vigas Norte y T-6 estaba fracturado (sobrecarga) en la soldadura del lado Norte, que incluyó una varilla de acero como material de relleno.	• El diafragma estaba intacto.

3.1.3 Observaciones Geotécnicas

La revisión de la documentación de diseño de los cimientos adyacentes al accidente mostró que el área se encuentra dentro de una zona de condiciones de subsuperficie que sufre una transición de un área de base rocosa relativamente poco profunda a una zona con depósitos de suelo de mayor espesor. Con base en la revisión de la documentación, se consideró posible que las diferencias en los tipos de cimientos a lo largo de la zona de falla hubieran dado lugar a asentamientos diferenciales entre los cimientos poco profundos y los cimientos profundos. De manera similar, la diferencia en las condiciones de la subsuperficie

SG-2020-435A

Sin comentarios

y los tipos de cimiento podrían haber resultado en respuestas sísmicas incoherentes entre los cimientos poco profundos y los cimientos profundos. Esto podría haber resultado en tensiones/deformaciones inducidas y/o desplazamiento lateral diferencial en el tramo que podría haber contribuido con la falla. También se observó durante la visita al sitio del accidente que no había señales obvias de afectación alrededor de las columnas de soporte o en el terreno adyacente que pudieran indicar potenciales deficiencias en los cimientos. Detalles adicionales de estas observaciones se incluyen en la Sección 3.1.2 del reporte de la Fase 2 (ver Anexo A).

3.2 Investigación de Causas Inmediatas y Análisis Estructurales

El reporte del análisis de causas inmediatas y de los análisis estructurales se muestra en el Anexo A. Personal de DNV se trasladó al sitio del accidente para inspeccionar y documentar fotográficamente la escena. Lo anterior incluyó la inspección visual de los elementos estructurales de acero, elementos estructurales de concreto, sistema de rieles, y coches del tren. La investigación in situ incorporó varias visitas al sitio por parte de diversos expertos en la materia, incluyendo en mecánica/estructural, metalurgia, concreto, civil y ferroviaria. DNV revisó el histórico de imágenes, videos, documentos de construcción y geotécnicos para determinar si había áreas de interés o condiciones que pudieran aportar elementos para determinar la ubicación o mecanismo principal de falla.

DNV obtuvo muestras de elementos del concreto para las pruebas de laboratorio que incluyeron pruebas de escaneo petrográfico, peso de la unidad, resistencia a la compresión, y módulo elástico. Se identificaron cinco (5) ubicaciones en las estructuras de acero que contenían fracturas como áreas de interés para el análisis fractográfico, análisis metalúrgico, y pruebas de dureza. Dichas ubicaciones incluyeron: una fractura en el cordón superior del marco transversal central, una fractura en el patín inferior de la Viga T-6, una fractura en la soldadura entre el alma y el patín inferior en la Viga Sur, y dos ubicaciones en las que se fracturó la soldadura entre el perno de corte y el patín superior (una en la Viga Sur y una en la Viga T-6).

Se tomaron las muestras de las Vigas Norte, Sur, y T-6 en ubicaciones adyacentes al tramo central del colapso para realizar análisis químicos y pruebas mecánicas que incluyeron pruebas de tensión y pruebas de impacto Charpy con entalle en V (CVN). Las pruebas se realizaron en los patines superior e inferior, almas, y atiesadores transversales (verticales) y longitudinales.

DNV desarrolló una serie de modelos computacionales para simular el comportamiento de la sección colapsada del puente elevado. Los análisis emplearon principios y procedimientos de ingeniería establecidos para estimar las tensiones en los elementos estructurales y el comportamiento del sistema. Los análisis de tensión se basaron en la descripción geométrica del puente elevado, en las observaciones en el sitio, propiedades del material que fueron medidas, el proceso de construcción y estimados de las cargas y frecuencias de operación y condiciones de carga extrema.

Los resultados de los análisis indican que el colapso ocurrió como resultado del pandeo de las Vigas Norte y Sur facilitada por la falta de pernos funcionales en una longitud significativa lo que causó que una parte del puente elevado perdiera su estructura compuesta. Como resultado, la estructura compuesta estaba operando como dos elementos paralelos independientes, una tablero de concreto y una viga de acero, que

Cristina del Carmen Flores García Luna
Perito Traductor
SG-2020-435A

Sin comentarios

experimentaron condiciones de carga para las que no estaban diseñadas. Lo anterior creó condiciones que llevaron a la distorsión del marco transversal central y la iniciación y propagación de grietas por fatiga que redujeron aún más la capacidad de la estructura para soportar la carga.

Los factores que contribuyeron a la falta de funcionalidad en los pernos incluyen pernos con soldaduras deficientes, pernos faltantes, y pernos mal colocados. Los posibles factores que contribuyeron al colapso incluyen deficiencias en las propiedades mecánicas de las vigas y en el diseño del marco transversal que no cumplió con los estándares de diseño AASHTO aplicables.[1]

A continuación, se muestra un resumen de hallazgos y observaciones adicionales identificadas (Ver Anexo A):

- Los componentes de la vía y las instalaciones que se encuentran al lado de la vía (balasto, durmientes, fijaciones, rieles, interruptores, uniones, cableado y ductos, línea aérea, etc.) se encontraron en buenas condiciones generales. No hubo evidencia de que cualquiera de los componentes o instalaciones inspeccionados contribuyeran con la falla.
- Se identificó una grieta por fatiga de 8.9-cm en el patín inferior de la Viga T-6 en la ubicación de la unión con la Viga Norte. La grieta se inició en la punta de la soldadura de filete que une el patín inferior de la Viga T-6 y el alma.
- Se identificó una grieta por fatiga, correspondiente a aproximadamente el 72% del área transversal del cordón superior, en el lado norte del marco transversal central. La grieta inició desde la punta(s) de la soldadura(s) de filete que unen al cordón superior con el refuerzo vertical.
- La calidad y desempeño (pruebas de tensión y flexión) de las soldaduras de los pernos que se inspeccionaron y probaron no cumplieron con los requerimientos del código AWS D1.1.[10,11] La resistencia a la tensión de los pernos probados de la sección este resultaron en resistencias a la tracción de 35 y 121 kN, una reducción significativa en comparación con el requerimiento de 221 kN, 15.8% y 54.7% respectivamente. Los ferrules de cerámica que se usaron para retener la soldadura fundida seguían presentes alrededor de los pernos, impidiendo que se pudieran realizar revisiones de calidad que podrían haberse realizado durante la construcción. De conformidad con el código AWS D1.1, debe realizarse una inspección visual en el 100% de las soldaduras de los pernos (Sección 7.8.1) y "los destellos de la soldadura de 360 grados alrededor del perno deben ser visibles".
- Se observaron prácticas de soldadura deficiente.
- El pandeo en el atiesador longitudinal de la Viga Norte se identificó por primera vez en enero de 2017, lo que indica que la estructura ya se encontraba en una condición comprometida antes del temblor de Puebla de 2017, y no como consecuencia del temblor. Esto es consistente con los resultados del análisis de respuesta estructural al temblor que se detalla en la Sección 4.3.2 del

10 American Welding Society (AWS) D1.1/D1.1M, Structural Welding Code – Steel, 18th Edition, 2002.
11 American Welding Society (AWS) D1.1/D1.1M, Structural Welding Code – Steel, 19th Edition, 2010.

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

Sin comentarios

reporte de la Fase 2 (Anexo A), que indican que la carga de operación de trenes en movimiento es más severa en cuanto a amplitud y numero de ciclos que la que ejerció el temblor.

- Se identificó una deflexión negativa significativa en los videos tomados por drones durante una inspección realizada en diciembre de 2019. La Viga Norte y la Viga T-6 mostraban la mayor deflexión. El estimado de la deflexión vertical de la Viga Norte era mayor a 3 pulgadas (7.6 cm) con base en una comparación con el espesor del patín inferior de la Subviga T-7 en la misma ubicación.

- Se identificó una progresión en la mancha de humedad, eflorescencia y separación de la unión del concreto precolado en el marco transversal central entre 2015 y 2019, indicando que el agua se estaba acumulando en esta ubicación y que estaba encontrando rutas de salida (probablemente a través de las grietas) desde la parte superior hasta el fondo de la plataforma.

- La sección transversal geológica del segmento Olivos – San Lorenzo Tezonco indica que el sitio del accidente está ubicado en una zona de transición con base rocosa relativamente poco profunda cerca de la estación de los Olivos y que va incrementando el espesor del suelo sobre la base rocosa conforme avanza hacia la estación San Lorenzo Tezonco. Los sistemas de cimentación del segmento parecen ser apropiados para las condiciones de la subsuperficie y las condiciones geológicas no parecen haber sido un factor contribuyente para la falla.

- Se identificaron daños por impacto que se rellenaron con concreto y que son consistentes con los causados con un martillo neumático, en las superficies superiores de los patines a lo largo de la mayoría de los patines accesibles. Esto indica que los orificios que se usaron para tener acceso a las vigas de acero para soldar los pernos se hicieron después de que se colocaron las losas de concreto precolado sobre la parte superior de las vigas de acero.

- Excepto por la sección transversal de pernos de la Viga T-6, todos los pernos examinados fallaron a través del alma. Los pernos examinados de la Viga T-6 mostraron diversas grietas que atravesaron el alma, la zona afectada por el calor (HAZ-Heat Affected Zone), y el metal de los pernos, lo que probablemente es atribuible a la fatiga.

- Se detectaron deficiencias en comparación con los criterios de diseño en todas las porciones de las estructuras de concreto que se probaron. Aunque los valores promedio cumplieron los criterios de diseño para resistencia a la compresión, varias muestras de la columna, paneles precolados y losas coladas en el sitio cayeron por debajo de los criterios mínimos especificados en las Normas Técnicas Complementarias Oficiales del Distrito Federal 2004 .[12] Todas las pruebas al concreto del cabezal fallaron al cumplir con los criterios de diseño y con los criterios estadísticos también especificado en las Normas Técnicas Complementarias Oficiales del Distrito Federal 2004.

12 Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras de concreto, Gaceta Oficial Del Distrito Federal, 6 de Octubre, 2004

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

Sin comentarios

- Todas las muestras de acero de refuerzo que se probaron como parte de la investigación posterior al accidente de DNV cumplieron con los criterios de diseño indicados en los cálculos de diseño, ilustraciones y especificaciones.

- El límite elástico promedio para las muestras que se tomaron del patín superior de la subviga T-1 (Viga Sur), 330 MPa, no cumplieron con el requerimiento Grado 50 de ASTM A572 de 345 MPa.

- El límite elástico promedio para las muestras que se tomaron de los patines inferiores de la subviga T-7 (Viga Norte) y Viga T-6, 335.5 MPa y 311 MPa, respectivamente, no cumplen con el requerimiento de Grado 50 de ASTM A572 de 345 MPa.

3.3 Análisis de Elementos Finitos y Revisión del Diseño

Se utilizó un modelo detallado de elementos finitos para realizar una revisión del diseño de conformidad con los requerimientos de AASHTO y un análisis del colapso. Los datos de estos análisis pueden encontrarse en el Anexo A Sección 4.2. Una descripción detallada del modelo de elementos finitos puede encontrarse en el Anexo D. DNV realizó una evaluación "como se diseñó" de conformidad con AASHTO para los escenarios: Resistencia I, Condiciones extremas I y condiciones de fatiga.[1] El modelo de análisis de elementos finitos (FEA) que se usó para esta revisión incorporó informaciones provenientes de los planos del diseño. Sin embargo, también se realizó un análisis del colapso usando el modelo FEA que incorporó las observaciones y hallazgos posteriores al accidente, refiérase al Anexo A– Sección 3. Por ejemplo, el número de pernos se tomó del Anexo A – Figuras 36-38. Con base en los resultados de las pruebas de laboratorio, los pernos no cumplieron con la capacidad de corte del diseño. Para los diferentes análisis del colapso se modificó la capacidad de corte de los pernos. También se consideraron los resultados de pruebas posteriores al material sobre el comportamiento del material plástico durante el análisis del colapso.

3.3.1 Modelado del peso muerto considerando la construcción en etapas

El puente elevado se erigió en diferentes etapas. En el análisis se refleja la secuencia de las operaciones de su erección. La principal herramienta que se utilizó para hacer lo es la característica de encendido y apagado en ANSYS. Normalmente todos los elementos están encendidos antes de que inicie un análisis (es decir contribuyendo a la rigidez global, fuerzas de resistencia y masa de la estructura), pero si se requiere ciertos elementos finitos pueden "apagarse" (o no contribuir con la rigidez global, fuerzas de resistencia y masa de la estructura) durante ciertas etapas del análisis y pueden encenderse en etapas posteriores.

La secuencia de erección es importante porque la acción compuesta no se encuentra disponible desde el primer momento. Después de que se instalen las vigas longitudinales se tienden las doce (12) losas precoladas sobre estas vigas. Las losas precoladas aún no están conectadas una con otra y tampoco con la viga, sin embargo, el peso de las losas precoladas ya está actuando sobre las vigas longitudinales y tiende a causar deformaciones en las vigas. Después del aumento en la deflexión debido al paso adicional de las losas, se establece (o se enciende) el contacto entre cada losa y después de eso también de los pernos. En ese momento es cuando se inicia la acción compuesta. Sin embargo, el tablero sigue sin cargas

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

Sin comentarios

del puente elevado global que se está pandeando, por lo tanto, las fuerzas axiales son muy bajas en el tablero.

Después de que empieza a trabajar la acción compuesta, se aplicaron todas las demás cargas. Para más detalles por favor refiérase a la Sección D-1.3 en el Anexo D para detalles adicionales. La Tablas D-4 y D-5 del Anexo D muestran una descripción detallada de las diferentes Etapas de Carga (LS por sus siglas en inglés) que caracterizan la secuencia de aplicación de cargas tanto para el análisis de diseño como para el de colapso.

3.3.2 Evaluación del Puente elevado "Como se Diseñó"

El diseño estructural del puente elevado fue revisado por medio de una validación independiente contra estándares internacionales. La condición "como se diseñó" del puente elevado se estableció usando el paquete original del diseño (es decir, los dibujos del diseño y los reportes de cálculo). Se usaron las especificaciones de los componentes estructurales junto con AASHTO LRDF 4ª Edición para obtener los parámetros nominales y de diseño. Para los propósitos de la validación, DNV evaluó la demanda vs. la capacidad de los componentes estructurales más relevantes contra las combinaciones de carga de AASHTO:

- **Fuerza I Combinación de cargas**: 1.25DL + 1.75 (LL+IM)
- **Evento Extremo I Combinación de cargas**: 1.25 DL + 1.0 EQ
- **Combinación de cargas por fatiga**: 0.75 (LL+IM)

donde, DL = Carga Muerta (Dead Load), LL = Carga Viva (Live Load), IM = Impacto y carga dinámica (Impact and dynamic allowance), y EQ = Fuerzas de Temblores (Earthquake Forces). El propósito de esta evaluación fue verificar si el puente elevado cumplía con los requerimientos de AASHTO.

3.3.2.1 Comentarios sobre el Paquete de Documentación del Diseño

DNV revisó los planos de diseño y los cálculos que por lo general aplicaban para todas las ubicaciones del puente elevado, incluyendo la sección colapsada. Sin embargo, la sección colapsada también tiene características únicas que requirieron de planos y cálculos más específicos y detallados. En particular, DNV entiende que hubo necesidad de hacer modificaciones en campo en la posición de los huecos en los paneles precolados debido a que no fueron fabricados correctamente para una transición entre un segmento de dos vías y un segmento de tres vías (ver la última foto de la Tabla 12). DNV desconoce la calidad de la ejecución de las modificaciones en el panel precolado, lo que podría haber conducido a la desviación observada en la disposición, cantidad y calidad de las soldaduras de los pernos en comparación con la especificación del diseño y de AASHTO. Esto puede explicar la presencia de pernos intactos en la porción este del puente elevado, donde las configuraciones del panel y de los huecos en los mismos fueron consistentes con los de un segmento de dos vías.

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

Sin comentarios

DNV

3.3.2.2 Requerimientos Generales de Dimensión y Detalles para componentes de acero

Conforme a AASHTO LRDF 4ª Edición - Sección 6.7, existen requerimientos generales sobre dimensiones y detalles que deben cumplirse al diseñar puentes. DNV realizó una verificación independiente del puente elevado "como se diseñó" y los resultados se resumen en esta Sección.

3.3.2.2.1 Contra Flecha por Peso Muerto

El diseño especifica un contra flecha por peso muerto de 50 mm. DNV estimó que la deflexión por peso muerto es de 75 mm. Este estimado asume un orden/etapas de construcción que se discuten en la Sección 4.1.2. La contra flecha de carga muerta especificada es de 50 mm que es menor a la deflexión estimada. Por lo tanto, con base en los estimados de DNV, el diseño no cumple con AASHTO LRDF 4ª Edición - Sección 6.7.2.

3.3.2.2.2 Propiedades de la sección transversal de los elementos de acero

El espesor de los elementos de acero excede el requerimiento mínimo de 8.0 mm, que se establece en AASHTO LRDF 4ª Edición – Sección 6.7.3.

3.3.2.2.3 Marcos Transversales

El diseño del puente elevado especifica un marco transversal espaciado cada 5.0 m, por lo tanto, DNV encuentra que la longitud ensombrecida de la viga principal se encuentra dentro de los límites conforme a AASHTO LRDF 4ª Edición - Sección 6.7.4.2-1. Sin embargo, AASHTO requiere que los cordones superior e inferior de los marcos transversales se unan directamente a los patines de la viga o a placas de conexión que se encuentren soldadas o unidas con pernos a los patines. DNV encuentra que el diseño no satisface los requerimientos de AASHTO LRDF 4ª Edición – Sección 6.6.1.3.1.

3.3.2.3 Requerimientos generales de dimensión y detalle para los componentes de concreto

AASHTO permite el uso de paneles precolados como una alternativa a los tableros colados en el sitio. Los paneles de concreto precolado se clasifican en paneles de profundidad total o de profundidad parcial. En tableros de concreto de profundidad total, los paneles precolados se unen con lechada de cemento estable que se vierte entre cada panel. La acción compuesta se logra con la lechada entre cada panel, y se usa una lechada en acanalamientos o en los huecos diseñados para crear espacios para los pernos que se sueldan al patín superior de las vigas principales. En un tablero de concreto de profundidad parcial, los paneles actúan como un encofrado perdido de concreto, y la acción compuesta es proporcionada por una losa colada in-situ que se coloca en la parte superior de los elementos precolados. El puente elevado, en el sitio del accidente utilizaba un tablero de concreto de profundidad parcial. Los paneles de profundidad parcial deben estar debidamente soportados por una superficie de apoyo sólida y uniforme entre los paneles y la viga. No proporcionar dicho soporte puede ocasionar roturas no deseadas en el elemento.

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

Sin comentarios

precolado y la potencial delaminación entre el concreto precolado y el concreto colado en el sitio[13]. De conformidad con AASHTO LRDF 4ª Edición - Sección 9.7.4.3.4, el diseño debe requerir que los paneles se asienten firmemente sobre una lechada colocada sobre la viga de soporte de manera que la lechada llene completamente los huecos entre los paneles y los patines de la viga. DNV no encontró especificaciones claras relacionadas con el correcto soporte de los paneles en los planos del diseño, y por lo tanto, encuentra que el diseño no cumple con los requerimientos de AASHTO.

Por otra parte, conforme a AASHTO LRDF 4ª Edición - Sección 9.7.4.3, la profundidad de cualquier encofrado de concreto no debe exceder el 55% de la losa terminada. El diseño especificó un elemento precolado con una profundidad de 15 cm para una plataforma terminada con un espesor promedio de 27.5 cm. Por lo tanto, el diseño cumple con los requerimientos de AASHTO.

El diseño especifica una superficie intencionalmente rugosa entre el concreto precolado y el concreto colado en el sitio con una amplitud mínima de 6 mm, lo que cumple con los requerimientos de AASHTO.

El diseño no indica un refuerzo de corte distribuido en la interfase entre el concreto precolado y el concreto colado en el sitio. Debe asignarse un reforzamiento mínimo en cumplimiento con AASHTO LRDF 4ª Edición - Sección 5.8.4.4., excepto cuando los cálculos lo indiquen de otra forma. A partir de la revisión de los reportes del cálculo de las vigas principales, DNV no encontró cálculos de la capacidad de corte en la interfase vs. la demanda para establecer la suficiencia del diseño. Por lo tanto, el diseño no cumple con los requerimientos de AASHTO.

3.3.2.4 Consideraciones del Estado Límite

DNV verificó que las vigas principales cumplieran con los criterios para ser clasificadas como una sección compacta conforme a AASHTO LRDF 4ª Edición - Sección 6.10.6.2.2. También, la profundidad de la resistencia a la compresión en condiciones de resistencia plástica es de alrededor del 12% de la profundidad total de las vigas compuestas. Por lo tanto, de conformidad con AASHTO LRDF 4ª Edición – Sección 6.10.7.1.2-1, 98% del momento plástico puede usarse para estimar la capacidad de la sección compuesta. Como el modelo de Elementos Finitos no produce directamente resultantes de esfuerzos (fuerzas cortantes, momentos etc), no se realizan las revisiones clásicas del código. En su lugar, DNV consideró de forma conservadora un estado límite en términos del esfuerzo de Von Mises considerando el factor de resistencia aplicable para mostrar que la configuración "como se diseñó" cumple con el estándar AASHTO. Para los pernos, DNV estimó que la capacidad del diseño de cada perno de corte individual era de 175.3 kN, de conformidad con AASHTO LRDF 4ª Edición- Sección 6.10.10.4.

3.3.2.5 Resistencia I Combinación de Cargas

3.3.2.5.1 Factores de Cargas Aplicadas

Los siguientes factores de carga se utilizaron para la evaluación de Resistencia I Combinación de Cargas.

[13] US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Steel bridge design Handbook, Publication No. FHWA-HIF-16-002 - Vol. 17 (December 2015)

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

Sin comentarios

Tabla 5- Factor de Carga para la Condición del Diseño

Carga en	Nombre del Factor de Carga	Factor de Carga
Peso muerto	DW (cargas de peso muerto)	1.25
Carga Viva	LL (carga viva vehicular)	1.75
Carga Viva	IM (asignación de carga dinámica del vehículo)	1.33[1]

1 - AASHTO recomienda un factor de 1.33 si no hay información detallada disponible. Sin embargo, el análisis transitorio realizado en DNV con tren en movimiento sobre el puente elevado mostró que el factor de amplificación dinámica es de 1.0. Las respuestas dinámica y estática del puente elevado (deformación) son casi idénticas.

3.3.2.5.2 Efectos de la no linealidad geométrica (efectos de segundo orden)

La deformación es considerada por un análisis estructural no lineal que toma en cuenta la condición de equilibrio en la configuración deformada (efectos de segundo orden) y una estructura imperfecta. Las imperfecciones son producidas por un análisis de pandeo no lineal y escalando las deformaciones de los primeros 100 modos de pandeo de manera que la imperfección máxima sea la longitud del puente elevado dividida entre un factor de tolerancia de 1000, por lo tanto, la imperfección máxima del modelo ideal es de 30 mm.

En general, la evaluación de un diseño por pandeo conforme a un estándar de diseño también toma en cuenta los esfuerzos residuales en la sección. Sin embargo, para la geometría real se espera que el efecto de esto sea pequeño en la condición "como fue construido" (as-built). Se espera que el efecto de esto pueda ser mayor con respecto al pandeo lateral de los patines superiores de las vigas cuando los pernos no están presentes en algunas longitudes del puente elevado. Por favor refiérase también a la Sección 5.4.2 del reporte de la Fase 2 (ver Anexo A) para consultar los detalles.

3.3.2.5.3 Resultados

Los resultados indican que la demanda es menor a la capacidad de cada uno de los miembros estructurales principales y, por lo tanto, bajo esta condición no se espera que se produzca la falla estructural. Los resultados detallados pueden encontrarse en el Anexo D. La siguiente tabla resume la utilización de la tensión.

Tabla 6- Factores de utilización para la Condición de Resistencia 1 de AASHTO

Elemento Estructural	Factor de Utilización (Proporción demanda vs. capacidad) asumiendo 5%

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

Sin comentarios

	relación de amortiguamiento
Viga Sur	0.87
Viga Norte	0.67
Perno crítico en Viga Sur	0.88
Perno crítico en Viga Norte	0.66

3.3.2.6 Resultados de la Condición de Evento Extremo I

DNV evaluó el comportamiento de la mayoría de los elementos críticos del puente elevado "como se diseñó" contra la condición de Evento Extremo I de AASHTO. Se usó el espectro de respuesta de diseño de acuerdo con la normativa local. El diseño asume un evento con periodo de recurrencia media de 500 años. DNV consideró un amortiguamiento modal del 5%, un factor de importancia de 1.5, y un factor de reducción de 2, conforme a los requerimientos del documento Bases del Diseño. DNV combinó los efectos ortogonales usando la raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SRSS) entre el 100% del espectro en cada dirección horizontal y el 50% del espectro en la dirección vertical. Los resultados indican que la demanda es menor que la capacidad para cada uno de los miembros estructurales y, por lo tanto, bajo esta condición no se predijo la falla estructural. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 7- Factores de Utilización para la Condición de Evento Extremo 1 de AASHTO

Elemento Estructural	Factor de Utilización (Proporción demanda vs. capacidad) asumiendo una proporción de amortiguamiento del 5%
Viga Sur	0.43
Viga Norte	0.408
Perno crítico en Viga Sur	0.65
Perno crítico en Viga Norte	0.65
Componente transversal crítico	0.14
Columna en la estación 10+242	0.85
Columna en la estación 10+272	0.96

3.3.2.7 Resultados para la Combinación de Carga de Fatiga

3.3.2.7.1 Historial de fuerzas y tensiones debido a la carga del movimiento vehicular

DNV realizó un análisis de movimiento de cargas de los trenes que pasan por ambas vías. El historial de carga consiste en un tren de 6 coches que pasa por el tramo norte a partir del Tiempo = 0 seg seguido de un tren que cruza a través de la ruta sur a partir del Tiempo = 50 seg. La magnitud de las cargas móviles así como su distribución espacial se muestra en la siguiente figura. Las cargas se desplazan a una

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

Sin comentarios

velocidad de 10 m/s y las historias de fuerzas y esfuerzos se obtienen para cada 0.1 segundos. El historial de fuerzas y tensiones de los elementos más críticos se muestra en las figuras 10 a la 13.

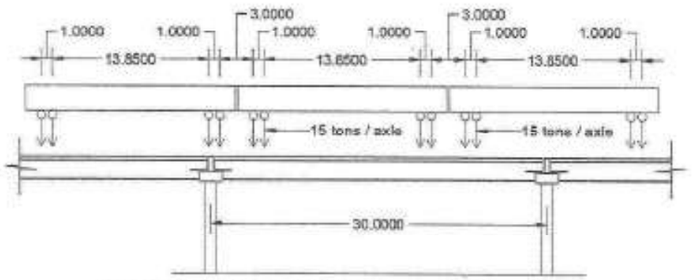


Figure 9 – Distribución espacial de las cargas en el punto de movimiento

Figura 10 - Historial de tensión sobre el cordón superior del elemento marco transversal a medio tramo

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

Sin comentarios

Figura 11- Historial de tensión en vigas principales

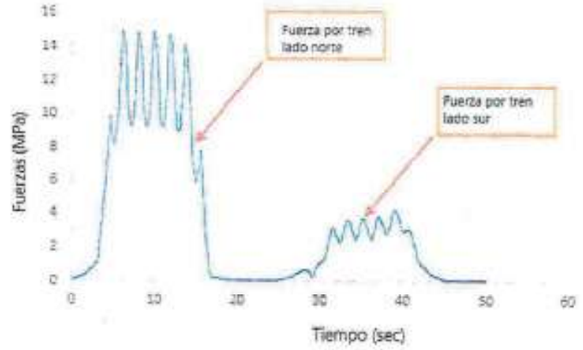


Figura 12- Historial de tensión en T-6

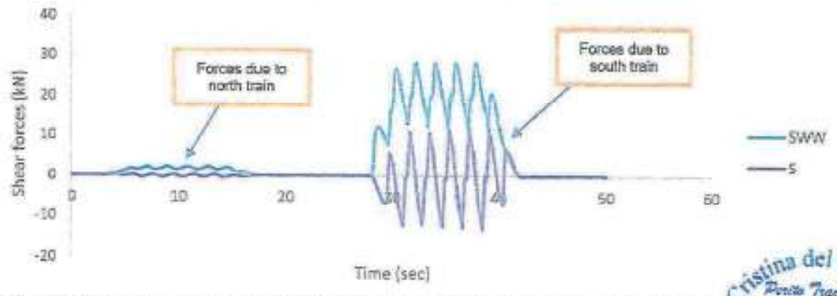


Figura 13- Fuerzas de corte en un perno localizado en la esquina suroeste (SWW) y de un perno localizado a mitad de la viga sur (S)

Cristina del Carmen Flores García
Perito Traductor Intérprete Jurado por el Tribunal Superior de Justicia de Antofagasta
Registro: SG-2020-435A

Sin comentarios

DNV continuó resumiendo el conteo de ciclos de los historiales que se muestran en la Figura 10 a la Figura 13. Con base en el historial actual de operación de la línea, DNV estimó que pasaron cerca de 720,000 trenes sobre la sección colapsada Los resultados se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 8- Conteo de Ciclos de los Análisis del Tren en Movimiento

Componente	Rango	Conteo por paso del tren	Conteo total de ciclos a lo largo de la vida de la sección colapsada, es decir 8 años (pasa un tren de 720k conforme a estimado de DNV del servicio real)	Conteo total de ciclos por 50 años (conforme a la suposición original de los diseñadores de 13.87M pasadas)
perno SWW	27kN	0.5	0.36M	6.94M
	20kN	5	3.6M	69.35M
	5kN	1	0.720M	13.87
perno S	23kN	5	3.6M	69.35M
	13kN	2	1.44M	27.74M
Viga sur	35Mpa	0.5	0.36M	6.94M
	10Mpa	5	3.6M	69.35M
Viga norte	29MPa	0.5	0.36M	6.94M
	7Mpa	5	3.6M	69.35M
T-6	12MPa	0.5	0.36M	6.94M
	5MPa	5	3.6M	69.35M
	5MPa	0.5	0.36M	6.94
Cordón del marco transversal	8MPa	0.5	0.36M	6.94M
	8MPa	5	3.6M	69.35M
	5MPa	1	0.720M	13.87M

3.3.2.7.2 Acumulación de daños

La acumulación de daño por fatiga se calcula con la siguiente bien conocida Regla de Miner para los diferentes rangos y ciclos de tensión que se resumen en la Tabla 8. De conformidad con la regla, la falla por fatiga ocurre cuando

$$\sum_{1}^{k} \frac{n_i}{N_i} \geq 1.0$$

Donde

n_i = número de ciclos contados para el rango de tensión "i" del análisis
N_i = número de ciclos necesarios para causar la falla con un rango de tensión determinado (es decir, resistencia a la fatiga).

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

Sin comentarios

DNV

3.3.2.7.3 Estimados de Resistencia a la Fatiga y Daño Acumulado conforme a AASHTO LRDF 4ª Edición

Pernos

La resistencia de corte por fatiga (Z_r) del conector de corte de un perno individual se calcula usando la ecuación en AASHTO LRDF 4ª Edición en 6.10.10.2-1 o

$$Z_r = \alpha d^2 \geq \frac{38.0d^2}{2}$$

Y (conforme a la ecuación en 6.10.10.2-2)

$$\alpha = 238 - 29.5 \log N$$

Donde:
d = 25 mm es el diámetro del perno
N = el número de ciclos

Por lo tanto, la tensión vs. ciclos (curva S-N) de los pernos se muestra en la Figura 14 a continuación. Un resumen del daño por fatiga correspondiente se muestra en la Tabla 9 más adelante. Una proporción de daño mayor a uno indica que el componente no tiene suficiente resistencia a la fatiga conforme al estándar AASHTO. Con base en la Tabla 9 se vuelve aparente que el daño acumulado para el perno más crítico es mucho más grande que 1 cuando se considera una vida de 50 años. La vida de fatiga estimada (es decir, el número de años para que el daño acumulado sea igual a 1.0) para el perno más crítico es 13.86 años. Además, se estimó que ninguno de los pernos cumpliría con el estándar AASHTO LRDF 4th Edition para una vida útil a la fatiga de 50 años. Hay que considerar que esta evaluación no tiene en cuenta las resistencias reducidas de los pernos según los ensayos de laboratorio, cuyos resultados fueron presentados en la Sección 3.4.3.4 del informe de la Fase 2 (ver Anexo A). Además, el análisis no tiene en cuenta el número reducido de pernos encontrados durante la inspección. Por lo tanto, se espera que la vida útil a la fatiga de los pernos en el estado de construcción sea mucho menor.

Figura 14- Curva S-N de los pernos conforme a AASHTO LRDF 4a Edición.

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

Sin comentarios

Tabla 9- Estimados de daño acumulado en los pernos críticos

Componente	Estimación de la proporción de daño acumulado en un ciclo de 8 años de vida del puente elevado	Estimación de la proporción de daño acumulado para un diseño de 50 años
Perno SWW	0.45	8.75
Tramo medio del perno	0.58	11.12

Vigas Principales, Viga T-6, y Elementos del Marco Transversal

De conformidad con AASHTO LRDF 4a Edición - Sección 6.6.1.2.2, la falla por fatiga ocurre cuando

$$\gamma(\Delta f) \geq (\Delta F)_n$$

Donde,

$\gamma = 0.75$ es el factor de carga especificado en AASHTO LRDF 4a Edición Tabla 3.4.1.1 para la combinación de carga por fatiga

(Δf) es el rango de tensión de carga viva debido al paso de la carga por fatiga (historiales ploteados en la Figura 10, Figura 11 y Figura 12).

Y

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N}\right)^{1/3} \geq \frac{1}{2}(\Delta F)_{TH}$$

Donde,

A es una constante tomada de AASHTO LRDF 4a Edición Tabla 6.6.1.2.5-1

N es el número de ciclos a los que el componente está sujeto a lo largo de su tiempo de vida

$(\Delta F)_{TH}$ es el umbral de fatiga a amplitud constante tomado de AASHTO LRDF 4a Edición Tabla 6.6.1.2.5-3

DNV considera que las vigas son una Categoría B de diseño, la viga T-6 una categoría C y los elementos del marco transversal una categoría E en la Tabla 6.6.1.2.5-1.

La resistencia a la fatiga en términos del rango máximo de tensión para un diseño de vida de [illegible] se muestra en la Tabla 10 a continuación.

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

Sin comentarios

DNV

Tabla 10- Resistencia a la Fatiga para Vigas Principales, Viga T-6, y Marcos Transversales.

Elemento Estructural	Resistencia máxima con rango de fatiga constante por 50 años	Umbral de fatiga de amplitud constante (es decir, límite de aguante)
Vigas principales	57.97	55
T-6	41.48	34.5
Elementos del marco transversal	26.15	15.5

En todos los casos, los resultados indican que el rango de tensión calculado se encuentra por debajo del umbral, indicando que no se espera una falla por fatiga de las vigas y de los elementos del marco trasversal.

3.3.3 Análisis del colapso

3.3.3.1 Descripción del Análisis

El puente elevado estuvo operando por aproximadamente 8 años y después falló repentinamente el 3 de Mayo de 2021. Con base en la evidencia histórica, hubo cambios que ocurrieron en la estructura al paso del tiempo, como manchas de humedad, deformación del atiesador longitudinal, y la deflexión vertical de las vigas principales y la rotación de la porción Norte sobresaliente y de la viga T-6. Esto sugiere que un proceso de degradación dependiente del tiempo contribuyó a estos cambios. De otra manera, la falla se habría observado desde el primer día de operación. Si las cargas (de diseño) nunca se hubieran excedido durante el tiempo de operación, entonces la fatiga de los componentes sería la causa más probable de la degradación. La corrosión, otro mecanismo de degradación común que depende del tiempo, no fue observada en ninguno de los miembros estructurales de forma que comprometiera la integridad de la estructura. Con base en los hallazgos que se presentan en la Sección 3.3.2.7, los pernos no cumplieron con los requerimientos de AASHTO respecto a la fatiga, de ahí el análisis que se presenta a continuación.

Los Análisis de la Etapa del Colapso (ACS por sus siglas en inglés) deberán reflejar los hallazgos y observaciones identificados después del accidente (hallazgos de la Fase 2) y deberán identificar por lo menos un escenario posible de lo que habría llevado al colapso. El escenario más probable se discute en esta sección. Una discusión más detallada se incluye en el Anexo D.

Mirando al puente elevado colapsado puede verse que parece que ambas vigas sufrieron deformación lateral de los patines superiores en el tramo medio. La Sección Oeste del puente elevado fue empujada hacia afuera de los neoprenos y cayó. La Sección Este del puente elevado aún se encontraba en la parte superior del cabezal. Esto es consistente con la condición del diseño de que el puente elevado tiene un soporte fijo en un extremo y un soporte deslizante en el otro extremo. Sin embargo, en los planos del diseño los soportes fijo y deslizante están al revés, de manera que la Sección Oeste es fija, y la Sección Este es deslizante. Por lo tanto, existe una desviación entre la condición "como fue construida" (as-built) y el diseño con relación a las condiciones de apoyo.

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

Sin comentarios

DNV

También se identificaron dos (2) grietas por fatiga en el tramo medio; una en la viga T-6 cerca de la unión con la Viga Norte, una en el cordón superior del marco transversal (lado norte) conectando ambos patines superiores de las vigas Norte y Sur. Una probable tercera grieta por fatiga se identificó en la soldadura del perno localizado en el tramo central en la Viga T-6.

Con base en la inspección por drones realizada en 2019, se estimó que la deflexión en el centro del tramo de la Viga Norte era mayor al espesor de su patín inferior, que es de 3 pulgadas(7.6 cm). Otra observación es que el atiesador longitudinal soldado a aproximadamente 30 cm por debajo de los patines superiores en el lado interior del alma de la Viga Norte mostró daño local por pandeo. Esto indica que la tensión por compresión en el alma relativamente esbelta (1.7 m de altura y 13 mm de espesor) ya era alta. Estas dos observaciones indican que la estructura compuesta estaba comprometida.

El panel de concreto mostró un nivel de tensión relativamente bajo en el análisis del diseño, por favor refiérase al Anexo D, Figura D-12, ploteo No.1. No hubo otras observaciones relevantes del sitio que indicaran que el panel de concreto hubiera fallado antes que las vigas. Con base en lo anterior se asume que las vigas longitudinales deben haber fallado primero. La deformación de las vigas después del accidente muestra grandes deformaciones en el alma y los patines superiores, pero solo pequeñas deformaciones en los patines inferiores. Después del accidente todos los pernos del lado Oeste del puente elevado fallaron, y aproximadamente 5 metros en la Sección Este fallaron. Por lo tanto, una posible longitud de aproximadamente 20 metros mostró fallas en los pernos, es decir 2/3 (66.7%) de la longitud del puente elevado. No fue posible determinar el número de pernos que fallaron antes del accidente y los que pudieron haber fallado luego del accidente. Sin embargo, 66% de la longitud de la viga principal mostró fallas en los pernos, y entonces los patines superiores ya no estaban conectados a los paneles de concreto precolado desde una distancia relativamente larga.

Uno de los parámetros desconocidos es la fricción entre los patines superiores de las vigas y los paneles de concreto. En el ACS final el coeficiente de fricción se fijó en 0 para facilitar que ocurriera el pandeo. Esta suposición parece adecuada ya que no se consideran imperfecciones en el ACS en general ni tampoco entre ambas superficies. En el modelo FEA (por sus siglas en inglés de Finite Element Analysis) ambas superficies descansan perfectamente una sobre la otra, lo que no es realista debido a las tolerancias de fabricación, y debido a que no existía el lecho adecuado como lo requería AASHTO (Ver Sección 3.3.2.3). Se espera que haya un contacto más local en algunos lugares a lo largo de los patines superiores de la viga, en lugar de una superficie de contacto completo como en el modelo FEA. Sin embargo, el efecto estabilizador debido a la presión de contacto entre ambas superficies se incluye en el análisis.

La diferencia entre el diseño y la condición "como fue construido" (as-built) es que en el modelo "como fue construido" (as-built) el número de pernos no corresponde a los dibujos del diseño, por favor refiérase a la Sección 3.1.2 y a las Figuras 36 a 38 del reporte de la Fase 2 (ver Anexo A). El número de pernos que se encontró en el lado Oeste del puente elevado se incorporó en el modelo "como fue construido" (as-built) de FE. En el lado Este no hay información detallada sobre el número y ubicación de pernos instalados, debido a que los paneles de concreto siguen en la parte superior de las vigas y el

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

Sin comentarios

DNV

acceso a los pernos fue muy limitado. Para simplificar el modelado, el número de pernos documentado en el lado Oeste se igualó del lado Este.

Se consideraron tres escenarios ACS; ACS-1, ACS-2, y ACS-3. Cada uno se discute a continuación.

Como se comunicó en la Sección 3.4.3.4 del reporte de la Fase 2 la fabricación de los pernos fue deficiente y no se cumplieron los requerimientos del código AWS D1.1. Los resultados de las pruebas de flexión y axial sobre cuatro de los pernos intactos de la parte Este del puente elevado mostraron que no se alcanzaron las capacidades requeridas. En el modelo FEA los pernos están conectados con resortes no lineales que se desconectan cuando se excede cierta fuerza (la capacidad). Esta característica se usa para revisar el comportamiento de los pernos con diferentes valores de capacidad. Al inicio del ACS todos los pernos están intactos (pero la cantidad y distribución se tomó en cuenta de acuerdo a la condición "como fue construido" -as-built-) y tienen la misma capacidad. Por favor refiérase a los resultados en la Sección 5.5.2.1 del reporte de la Fase 2. Este análisis se llama ACS-1.

Se realizó un nuevo ACS llamado ACS-2. En este análisis se asumió que todos los pernos en una longitud de 20m del lado Oeste ya habían fallado excepto por la primera fila de pernos de la columna Oeste. Los resortes de los pernos se cambian de resortes no lineales (límite de capacidad) a resortes lineales. Estos resortes lineales representan una capacidad infinita y no pueden fallar. En el modelo FEA las imperfecciones geométricas no se toman en cuenta. Sin embargo, para que ocurriera el pandeo, las tensiones residuales y las imperfecciones juegan un papel importante. En lugar de imperfecciones en el modelo geométrico, el límite elástico del material se redujo a un factor de 0.8. Una reducción en el límite elástico se justifica ya que el patín superior ya no está soportado en una longitud de alrededor de 20 m. y partes de la viga de acero se soldaron en el sitio de la instalación (cada viga fue entregada en 3 piezas), por lo tanto, puede asumirse que las imperfecciones son más bien grandes. Para los resultados, por favor refiérase al Anexo D – Sección 2.6.2.

El análisis ACS-3 es similar al ACS-2. La diferencia es que, para ACS-3 se eliminó la primer fila de pernos d ela columna oeste del modelo FE antes de que iniciara el análisis. Este análisis se realizó primero con una reducción en el factor del límite elástico de 0.80 pero la solución se detuvo antes de que se aplicara completamente el peso muerto. Por lo tanto, se utilizó un factor de reducción aumentado de 0.90 para completar el análisis.

El análisis considera imperfecciones reduciendo el límite elástico, justificando la tensión adicional causada por la imperfección. Los valores teóricos se muestran en el Anexo D. Como se discutió antes, para los propósitos de esta simulación del colapso, se presenta un factor de reducción del límite elástico α de 0.90, que es más conservador que los valores teóricos que se presentan en el Anexo D.

3.3.3.2 Análisis de la Etapa del Colapso

Para obtener resultados detallados de los diferentes análisis de ACS, se remite al lector al Anexo D. En esta sección, se presentan los resultados para el escenario de falla más probable, ACS-3.

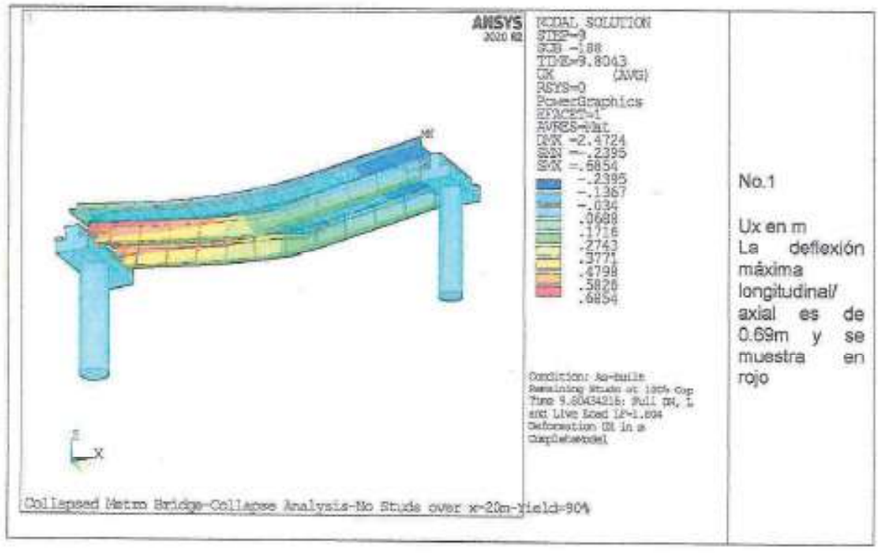
3.3.3.2.1 Análisis del Colapso - ACS-3

Cristina del Carmen Flores García Luna
Perito Traductor de Inglés autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo
Registro: SG-2020-436A

Sin comentarios

Este análisis refleja la condición de los pernos fallidos en una longitud de 20m desde el lado Oeste hacia la columna Este. En el ACS-3, el puente elevado comienza a pandear a partir del paso de carga de 8.37 lo que representa 37% de la carga viva total (la carga viva se empieza a aplicar después del paso número 8, y se completa su aplicación en el paso número 9, por lo tanto, el paso de carga 8.37 corresponde al peso muerto total y 37% de la carga viva). Se refiere al lector al Anexo D Tabla D-5 para más detalles relacionados con los pasos de aplicación de la carga. En el momento en el que la carga viva es aplicada la característica de estabilización de ANSYS se ajusta para sobreponerse a la no convergencia debida a los altos residuos en el vector de fuerzas. Se aplica el valor estándar de 1.0e-4 para la proporción de disipación de energía. Este valor se reduce a 0 al final del paso de la carga. Con este comando ANSYS introduce un pequeño resorte en cada nodo que ayuda a reducir los residuales. Sin embargo, una parte de la fuerza va a estos resortes y se "desvanece". En el tiempo 8.37 la energía de estabilización excede el 1% del total de la energía potencial. Este es el momento en el que comienza el pandeo.

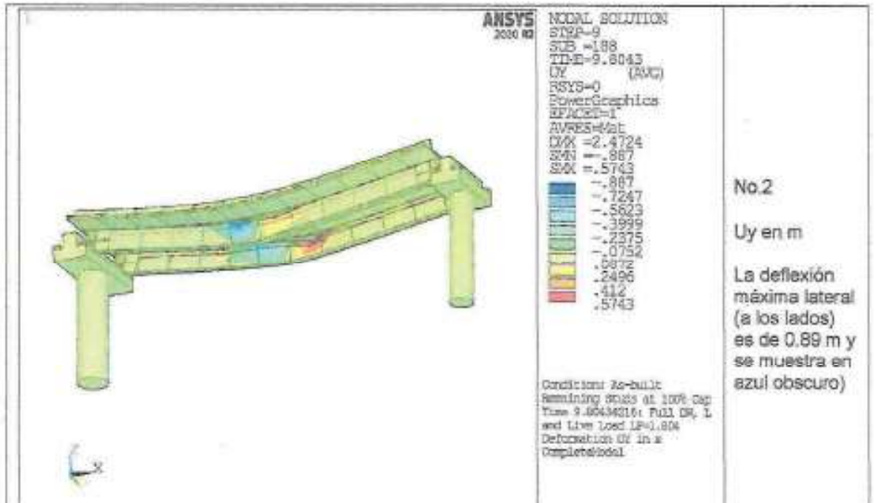
A continuación, se presentan ploteos de la deformación que muestran el último paso de carga que convergió y la deformación inicial.



Cristina del Carmen Flores García
Perito Traductor de Inglés autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo
Registro: SG-2020-436A

Sin comentarios

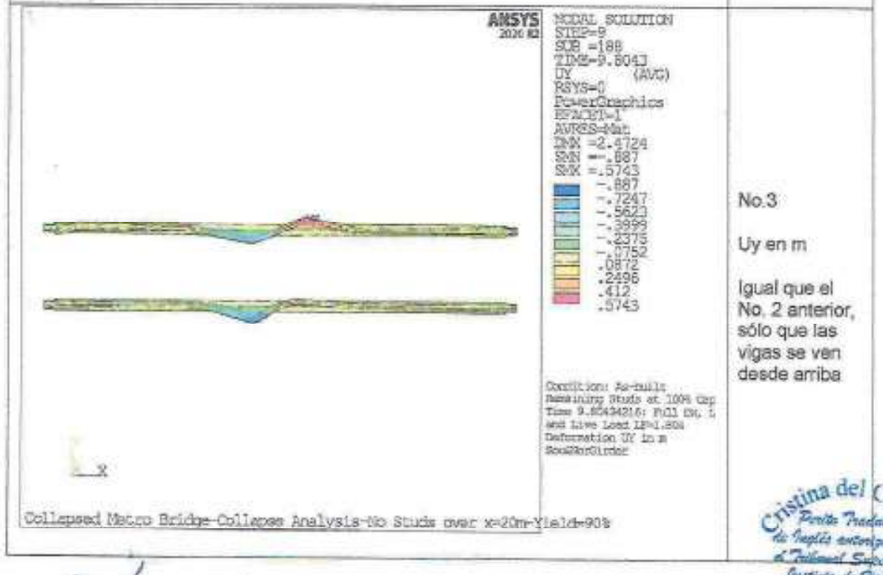
DNV



No.2

Uy en m

La deflexión máxima lateral (a los lados) es de 0.89 m y se muestra en azul obscuro)



No.3

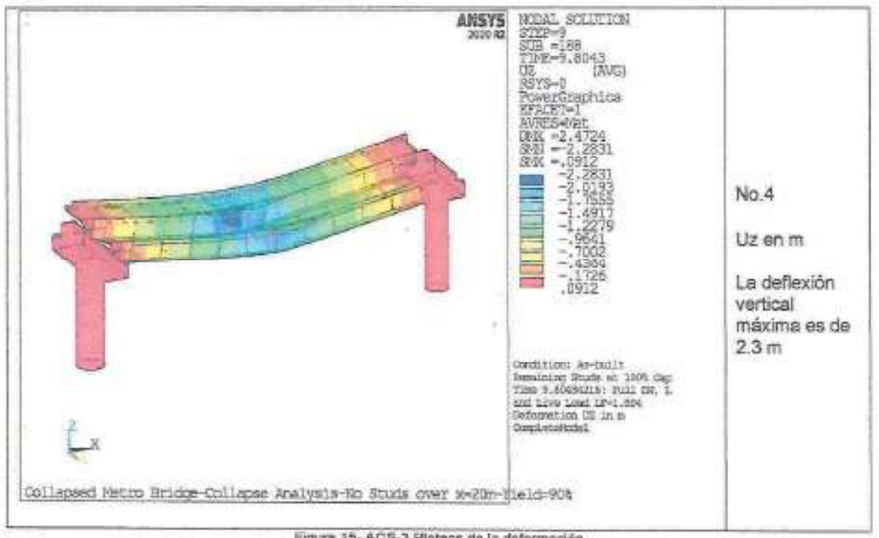
Uy en m

Igual que el No. 2 anterior, sólo que las vigas se ven desde arriba

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

T1145516-2021-SGIRPC-ACR-DFIII-L12 REV. 0
Enero 2022

Sin comentarios



No.4

Uz en m

La deflexión vertical máxima es de 2.3 m

Figure 15- ACS-3 Ploteos de la deformación

En el ploteo No. 1 de la figura 15 se presenta la deformación longitudinal, Ux. Los resultados indican un desplazamiento longitudinal máximo de 0.69 m. La viga casi se está deslizando del soporte, lo que es consistente con un colapso completo de la Sección Oeste.

En el ploteo No. 2 y 3 se muestra el desplazamiento transversal, Uy. Los resultados indican un desplazamiento lateral máximo de más de 800 mm. Debido a la deformación en ambas vigas, ya no es posible la transferencia de fuerzas de compresión axial. Esto resulta en un gran desplazamiento en dirección vertical, Uz, por favor refiérase al ploteo NO. 4. La deflexión vertical máxima es de más de 2.2 metros

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

Sin comentarios

DNV

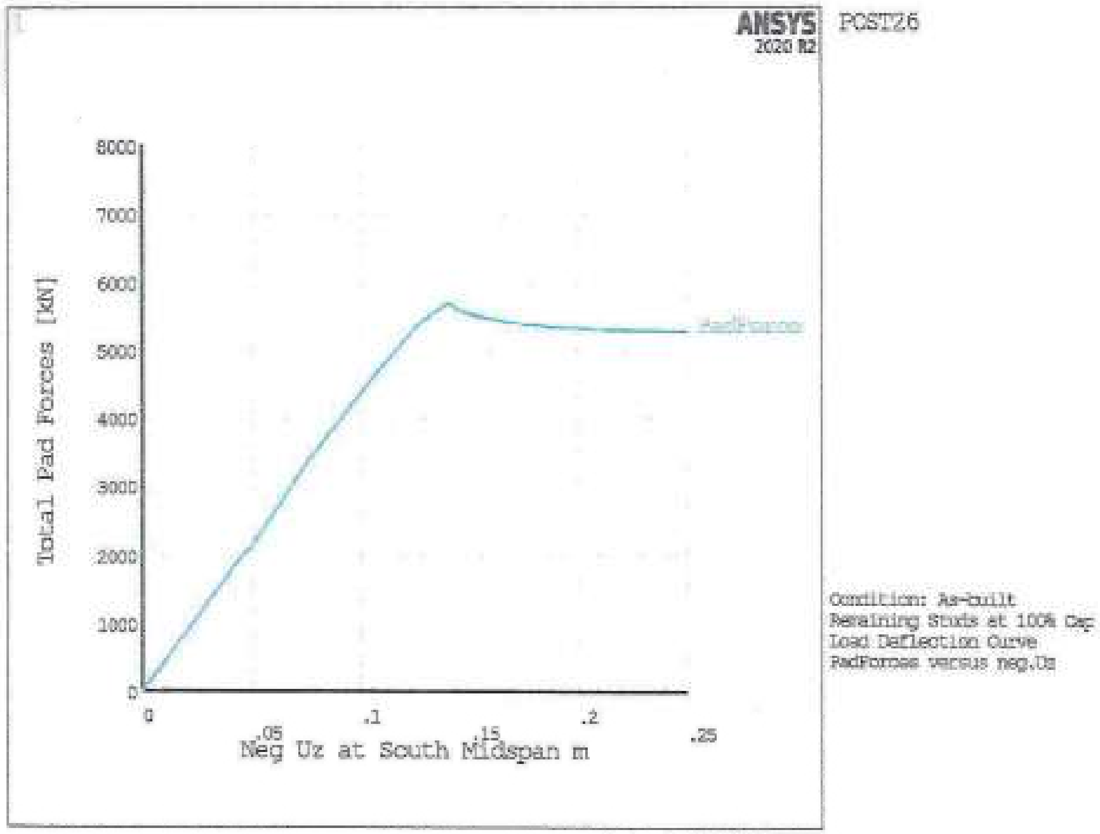


Figura 16- Curva de Deflexión de Carga

En la Figura 16, se presenta la curva de deflexión de carga. Esta curva muestra cómo la carga vertical (fuerza total de todos los cinco [5] soportes de neopreno del puente elevado) varía en función del desplazamiento vertical de la Viga sur. La fuerza en los soportes de neopreno total aumenta casi linealmente hasta que se alcanza un máximo que se encuentra alrededor de 5700 kN. Y después la curva comienza a caer hasta un mínimo relativo de 5200 kN. El máximo absoluto representa la capacidad de soporte de carga del puente elevado. Cualquier carga adicional posterior a esa es tomada inmediatamente por los resortes de estabilización. La estructura del puente elevado no podía soportar ninguna carga adicional (es decir, colapsa).

3.4 Conclusión de los Análisis de Diseño y Colapso

3.4.1 Evaluación del Diseño

DNV identificó ciertos aspectos del diseño que no cumplían con AASHTO LRDF 4ª Edición, ni con los estándares típicos de la industria. A continuación, se presenta un resumen:

- Los planos carecen de detalles específicos sobre el diseño de los componentes de los paneles precolados que se usaron en la zona de transición entre una sección de 2 vías y una sección de 4

Sin comentarios

DNV

vías. Esta se considera la probable razón para las modificaciones en los paneles precolados durante la construcción, como se evidencia rellenado de los huecos para pernos no utilizados y que estuvieron mal alineadas con vigas principales y también la presencia de marcas de martillo neumático observadas en los patines superiores que sugieren la fabricación in situ de orificios para el soldado de los pernos.

- La resistencia a la fatiga de los pernos no cumplió con las especificaciones de AASHTO, aún en un escenario en el que el puente hubiera sido construido conforme a las especificaciones, se espera que los pernos más críticos hayan fallado luego del paso de 1.25 millones de trenes, o aproximadamente 14 años de operación.
- Se encontró que el puente elevado cumple con los requerimientos de AASHTO respecto a la resistencia ultima y condiciones extremas
- Los miembros estructurales con excepción de los pernos se encontraron aceptables respecto a la fatiga
- DNV encontró problemas de detallado como un lecho adecuado de los paneles precolados, detalles de conexión en los elementos del marco transversal, etc. Estos problemas pueden considerarse contribuyentes del colapso del puente.

3.4.2 Análisis de la Etapa del Colapso

La incertidumbre en la restricción lateral del patín superior en una región sin pernos efectivos hace difícil estimar una capacidad de deformación precisa del patín en el momento en el que pasa el tren. Sin embargo, los análisis realizados sobre el colapso son útiles para comprender mejor y documentar el desarrollo de la falla del puente elevado e identificar un escenario muy probable que llevara al colapso.

En la simulación del colapso que se presentó anteriormente, (ACS-3), los patines pueden moverse libremente en dirección longitudinal en relación con el concreto porque se perdió la acción compuesta después de la falla de un número significativo de pernos en la porción oeste del puente. Bajo esta condición el puente elevado falla debido a la aplicación de una carga por debajo de la carga de servicio (es decir, 1 vez DW más 1 vez LL). Cada viga longitudinal comienza a pandear transversalmente.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que el puente elevado funcionó durante 8 años. DNV ha demostrado que los pernos no son redundantes en el sentido de que una vez que se alcanza la capacidad máxima del perno más crítico, el resto falla en cascada. Por lo tanto, como se discutió anteriormente, un mecanismo de falla dependiente del tiempo es la explicación más probable para el inicio del proceso en el que el tramo entró en una condición en la que 20 metros de los pernos habían fallado. Con base en las observaciones de campo y los resultados del análisis presentado en esta sección, DNV encuentra que el escenario más probable de falla involucra la iniciación y propagación de grietas por fatiga en las soldaduras de los pernos en la mitad del tramo. Estas grietas por fatiga se propagaron y provocaron la falla completa de varias soldaduras de pernos, lo que provocó una redistribución de las fuerzas cortantes dentro de los pernos intactos. Esta redistribución provocó un aumento en la tasa de acumulación de daño entre los pernos

Registro: SG-2020-435A

En las conclusiones del modelo elaborado por DNV, se estableció que incluso si todos los pernos hubieran sido colocados conforme al proyecto (lo cual no sucedió), las deficiencias en el diseño eran tales, éstos habrían fallado al llegar a los 14 años de operación.

intactos que están más cerca de la mitad del tramo. Por lo tanto, el número de pernos dañados en la mitad de la sección elevada del puente es tal que las tensiones en los pernos intactos exceden la capacidad máxima de los pernos más débiles en la parte occidental del puente, lo que lleva a una falla en cascada de los pernos, lo que aumenta la longitud no reforzada de las vigas principales del viaducto y, en última instancia, conduce a la inestabilidad y a un modo de falla por pandeo. La fricción y la unión entre el concreto y las vigas de acero producen un efecto estabilizador en ausencia de los pernos, que también se espera que se haya deteriorado con el tiempo dadas las limitadas zonas de contacto debido a la mala cimentación de los elementos prefabricados.

4.0 LÍNEA DEL TIEMPO DE EVENTOS

4.1 Línea del Tiempo Histórica

Se revisaron los documentos que se anotan en la Sección 2.2 y se construyó una línea del tiempo histórica. La Figura 17 es la línea de tiempo histórica que muestra los eventos clave para la L12, comenzando con el inicio de actividades contractuales en enero 2008. La operación de la L12 comenzó el 30 de octubre de 2012. Otro hito relevante ocurrirá el 31 de diciembre de 2026 con la terminación del periodo de arrendamiento del material rodante. El día del incidente en la L12 fue el 3 de mayo de 2021. La línea del tiempo incluye fechas de:

(1) actividades de contratación (diamantes y corchetes verdes),

(2) actividades de construcción original y puesta en marcha (corchetes anaranjados),

(3) mantenimiento y operación de la L12 (círculos y corchetes azules),

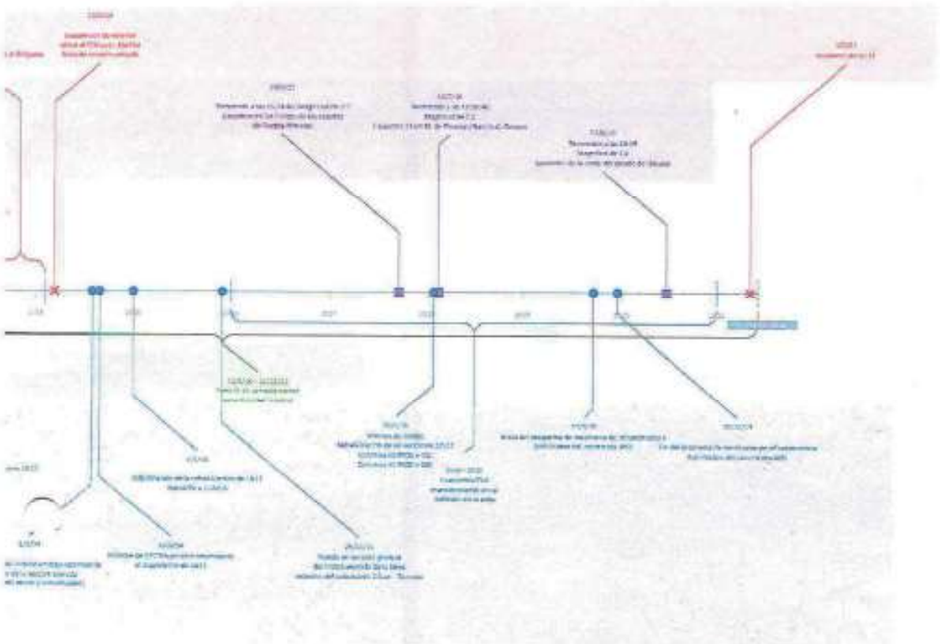
(4) temblores (cuadros morados), y

(5) eventos significativos durante la operación de la L12 ("X" y corchetes rojos).

En la Sección 1.4 se presenta un resumen de las contrataciones asociadas con la L12. Lo anterior se realizó con el fin de presentar a las entidades y partes interesadas relevantes que se mencionan a lo largo de todo el documento. Los detalles asociados con el diseño, construcción, mantenimiento y operación se discuten a continuación.

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

Sin comentarios



a del tiempo incluye fechas de: (1) actividades de contratación (diamantes y corchetes verdes), (2) actividades de construcción original y puesta en
i), y (5) eventos significativos durante la operación de la L12 ("X" y corchetes rojos).

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

Sin comentarios

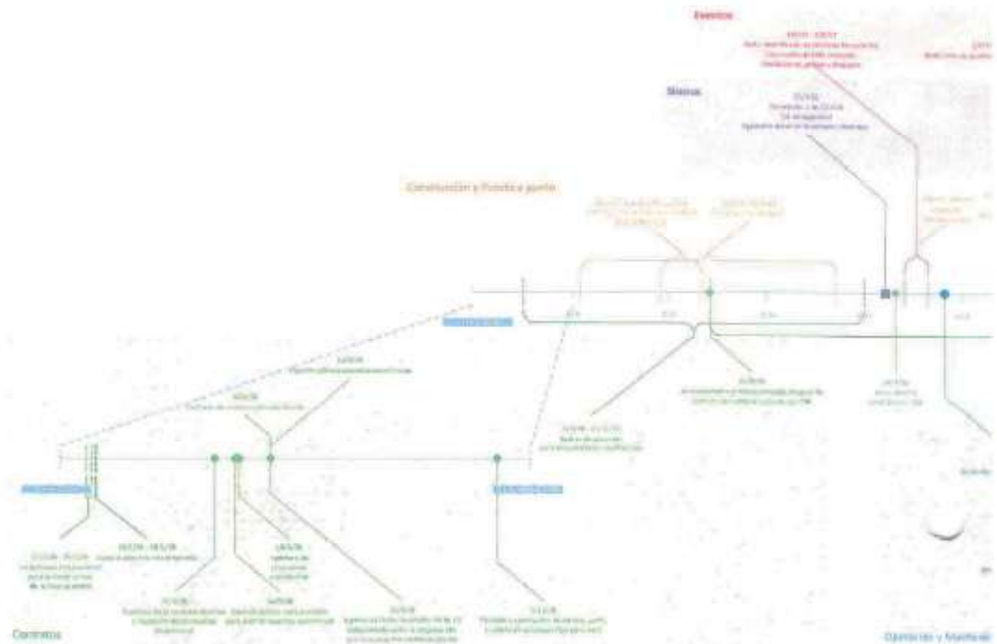


Figura 17- Línea del tiempo histórica que muestra los eventos clave de la L12 desde el inicio de contrataciones en enero de 2008. L
marcha (corchetes anaranjados), (3) mantenimiento y operaciones de la L12 (círculos y corchetes azules), (4) temblores (cuadros m

Sin comentarios

DNV

4.1.1 Diseño de la L12

La documentación del diseño de las obras de ingeniería civil, material rodante, y sistemas ferroviarios para la L12 se resume a continuación. La documentación de diseño de las obras de ingeniería civil se resume, en parte, en el reporte de la Fase 2, incluyendo los cimientos (Fase 2, 3.3.2), columnas de concreto (Fase 2, Sección 4.2.1.1), cabezales de concreto (Fase 2, 4.2.1.2), vigas de acero (Fase 2, Sección 4.2.1.3), marcos transversales intermedios (Fase 2, Sección 4.2.1.4), y los diefragmas colectores de los extremos (Fase 2, Sección 4.1.2.5). Dichos resúmenes no se reproducirán aquí, pero se encuentran disponibles en el Anexo A. Una comparación entre las condiciones de diseño y las condiciones "como se encontraron" las obras de ingeniería civil se muestra en la Sección 4.1.2.2 de este reporte.

4.1.1.1 Obras de Ingeniería Civil

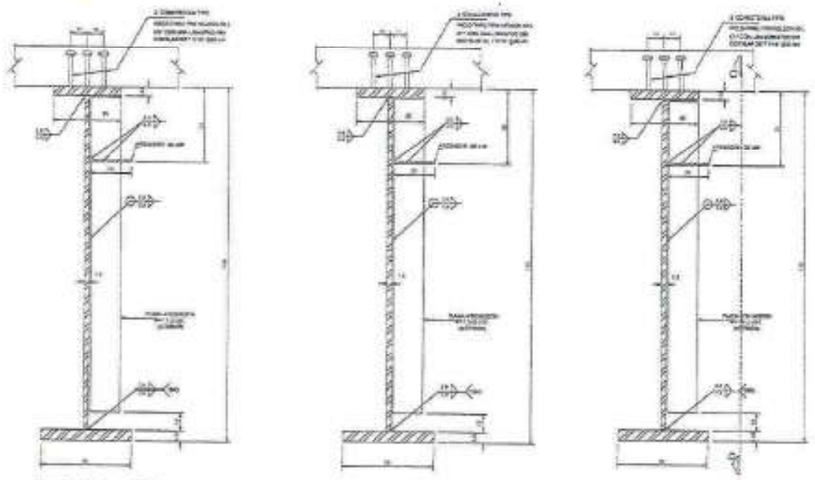
El diseño inicial de la L12 era originalmente como línea subterránea y se hizo una modificación para que fuera elevado en la sección Este entre 2008 y 2012 [497,498]. La justificación para este cambio no fue detallada. Como se anotó anteriormente, el colapso ocurrió en la porción elevada localizada entre las estaciones Olivos y San Lorenzo Tezonco de la L12 entre las Columnas 12 y 13.

4.1.1.1.1 Pernos

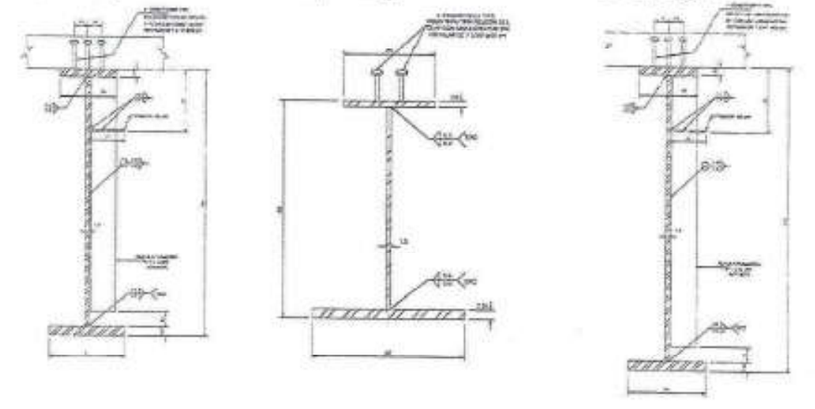
La Figura 18 contiene detalles de ilustración que muestran las secciones transversales de las Subvigas T-1, T-2, T-3, T-5, T-6, y T-7. Se anota el número y distribución de los pernos del diseño. Para las Subvigas T-1, T-2, T-3, T-5, y T-7, debieron instalarse tres pernos de 25 mm de diámetro cada 30 cm a lo largo de la longitud de la viga. Los tres pernos debieron instalarse en una línea perpendicular a la longitud del patín superior. Un perno de corte debía instalarse en el centro del alma y los dos pernos restantes debían espaciarse 11 cm en el centro a cada lado del perno de corte central. La Subviga T-6 tiene una configuración diferente en la que sólo dos pernos de 19 mm de diámetro debían ser instalados cada 30 cm a lo largo de la longitud de la viga. Los dos pernos debían estar instalados en una línea perpendicular a la longitud del patín superior. Los dos pernos debían estar equidistantes del centro del alma; sin embargo, no se especificó el valor en las ilustraciones del diseño. Debe observarse que los estándares AASHTO especifican que la distancia entre los pernos es de cuatro (4) diámetros del perno. Por lo tanto, la distancia entre los pernos de por lo menos 7.62 debería haberse indicado en los planos. En las observaciones en campo y en el reporte de la Fase 2 se observaron las desviaciones contra el diseño en la estructura "como fue construido" (as-built). El resumen de estas desviaciones se muestra en la Sección 4.1.2.2 a continuación.

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

Sin comentarios



a) Subviga T-1 b) Subviga T-2 c) Subviga T-3



d) Subviga T-5 e) Subviga T-6 f) Subviga T-7

Figura 18- Detalles de ilustración que muestran las secciones transversales de las subvigas T-1, T-2, T-3, T-5, T-6, y T-7. Se anota el número y distribución de los pernos. Unidades en cm.[768]

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

Sin comentarios

4.1.1.2 Material Rodante

En el Anexo E, Sección E-1.1.1. se muestra una revisión detallada del diseño del material rodante. El hallazgo principal de la revisión es que el diseño del material rodante no fue causal del Accidente en la L12.

4.1.1.3 Sistemas de Rieles

En el Anexo E, Sección E-1.1.2. se muestra una revisión detallada del diseño de los sistemas de rieles. El hallazgo principal de la revisión es que el diseño del sistema de rieles no fue la causa del Accidente en la L12.

4.1.2 Construcción de la L12

La construcción de la L12 comenzó en 2009. La Tabla 11 contiene un resumen de la construcción de la L12 entre las Columnas 12 y 13 [865-876]. En la tabla se muestran la fecha, etapa de la construcción y fotografías de las actividades que le acompañan. Los cimientos se denotan como "Z" para "Zapata" y las columnas/soportes se denotan como "A" para "Apoyo". Para el segmento de vías entre las Columnas 12 y 13, la construcción se realizó primeramente entre diciembre de 2009 y junio de 2011. La tabla se recopiló revisando las bitácoras de supervisión de Ingeniería Asesoría y Consultoría S.A. y C.V. (IAC) de la Secretaría de Obras y Servicios para el Proyecto Metro. DNV revisó las bitácoras semanales del progreso y las fotografías para tener un entendimiento básico del proceso de construcción; Adicional a estas bitácoras semanales de progreso, se revisaron los cuadernos de campo del IAC. Las bitácoras de campo se entregaron al EPC y al Proyecto Metro para su revisión y aprobación.

En estas bitácoras de campo se identificaron no conformidades con el número y ubicación de pernos colocados en comparación al diseño, en el intertramo Olivos – San Lorenzo Tezonco, sin embargo, no se observaron no conformidades entre las columnas 12 y 13. Las bitácoras indican que se abordaron estas no conformidades; sin embargo, los detalles sobre cómo se realizó y quienes no fueron proporcionados. No se observaron desviaciones adicionales en el diseño en otra información revisada, sin embargo, se observó en varias áreas de la documentación que se estaba realizando trabajo fuera de los diseños aprobados que nos fueron proporcionadas pero las bitácoras mostraban diversas áreas en las que el trabajo se realizó fuera de los diseños aprobados ("los trabajos que se están realizando… no están indicados en su proyecto autorizado" que se traduce a "trabajo realizado sin proyecto"). Los hallazgos más relevantes de las imágenes presentadas en la tabla se resumen a continuación:

- Mala alineación de los huecos en el concreto precolado con relación a la ubicación de las vigas. Esta causa de mala alineación no pudo ser confirmada. Probablemente estaba asociada con un cambio en el diseño de las vigas o de los paneles, o fue un problema de instalación.

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

Sin comentarios

Sin comentarios

DNV

Tabla 11- Resumen de las actividades de construcción entre las Columnas 12 y 13. La ubicación de la Columna 12 y Columna 13 referidas como 10+242 y 10+272, respectivamente. Los cimientos se denotan como "Z" para "Zapata" y las columnas/soportes se denotan como "A" de "Apoyo".

Fecha	Etapas de la construccion	Evidencia de los reportes de supervisión
Diciembre 2009	- Cimiento Z-106 (10+242) - Columna 12 / Soporte A-106 (10+242)	Se realizaron trabajos de colado de la zapata Z-106 apoyo 10+242. 08 de Diciembre. 09 Trabajos de dolado y desdimbrado de la columna con apoyo 10+242. 16 de Diciembre. 09
Febrero 2010	- Cimiento Z-107 (10+272)	Se realizan trabajos de armado de la zapata Z-107 con cadenamiento 10+272. 05 de Febrero. 10 Se realizan los trabajos de colocación de la cimbra para realizar el colado del dado del la zapata Z-107 08 de Febrero. 10
Marzo 2010	- Construcción de la estructura del cabezal de concreto para A-106 con Z-106	

Sin comentarios

11 de Marzo. 10

Abril 2010

- Instalación de cabezal de concreto sobre A-106

Se realizaron trabajos de armado del cabezal en la zapata Z-106 con cadenamiento 10+242.

24 de Abril. 10

Se realizan los trabajos del retiro de cimbra metálica del cabezal en la zapata Z-106 con cadenamiento 10+242.

28 de Abril. 10

Mayo 2010

- Preparaciones entes de la instalación del cabezal de concreto sobre A-107

Se observa el inicio de los trabajos de obra falsa en la zapata con apoyo 10+272

04 de Mayo. 10

Julio 2010

- Instalación de vigas 10+242

Trabes que se encuentran montadas en el interzano del apoyo con cadenamiento 10+187 al 10+212 y 10+242.

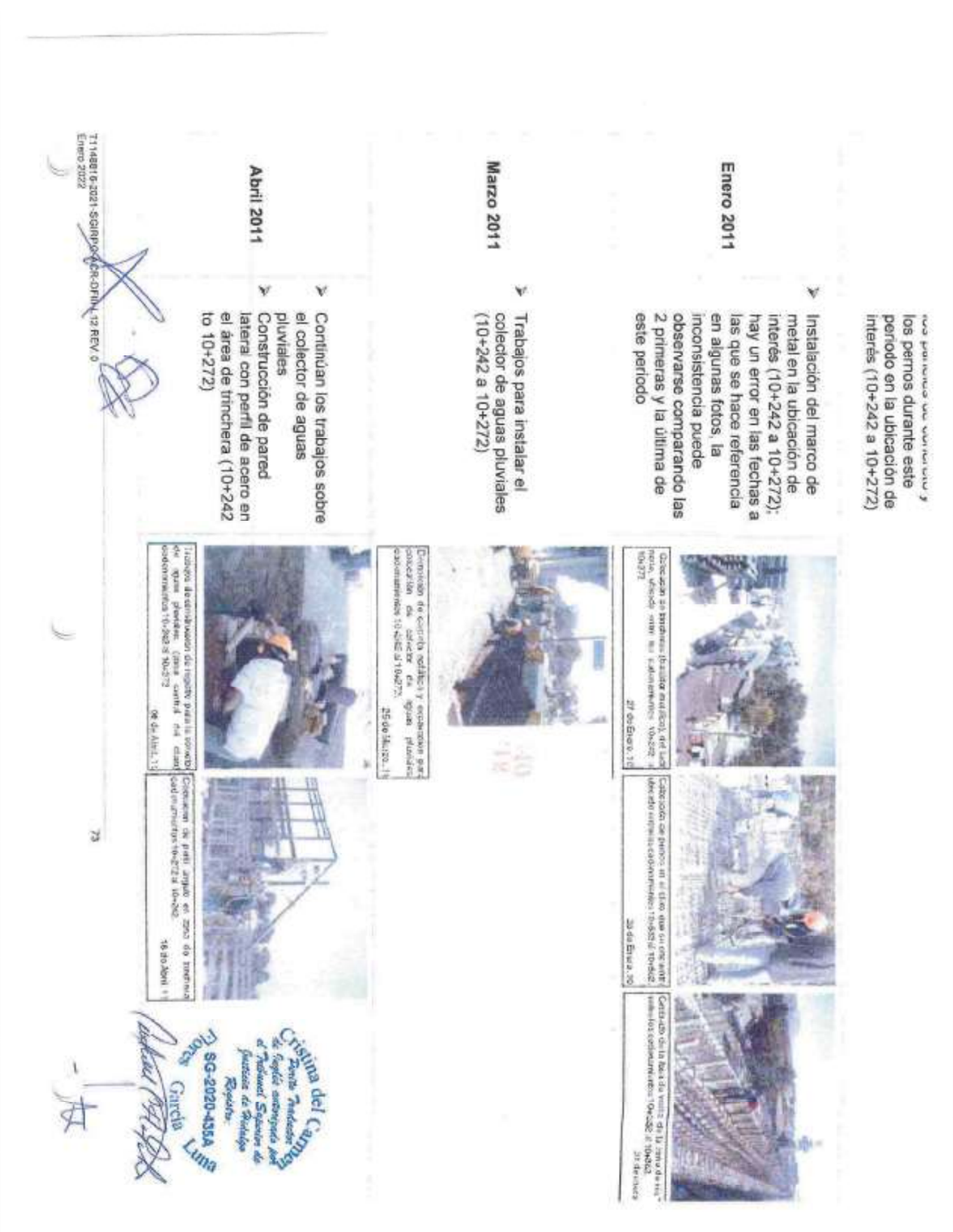
24 de Julio. 10

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

Sin comentarios

DNV

Fecha	Etapas de la construcción	Evidencia de los reportes de supervisión
Agosto 2010	➢ Trabajo sobre las vigas relacionado con el tramo 10+242 a 10+272	Aplicación de soldadura en trabes metálicas, ubicados entre los cadenamientos 10+242 al 10+272 18 de Agosto 10
Septiembre 2010	➢ Trabajo en A-107	Cimbra metálica y bancos para apoyos de neopreno en armado del cabezal, con cad. 10+272. 23 de Septiembre. 10
Octubre 2010	➢ Instalación de paneles de concreto precolado sobre las vigas y la instalación de pernos en un tramo junto a la ubicación de la falla (10+212 a 10+242). La foto de la derecha muestra la soldadura en progreso del perno y 4 pernos sueltos. En Q4 de 2010 no hay fotos específicas de la ubicación de la falla, pero puede considerarse siguiendo la	Colocación de tabletas en trabes metálicas entre los apoyos con cadenamiento 10+212 AL 10+242. 04 de Octubre. 10 Trabajos de colocación de pernos en tabletas entre los apoyos 10+212 al 10+240. 05 de Octubre. 10



los pernos durante este periodo en la ubicación de interés (10+242 a 10+272)

Enero 2011

- Instalación del marco de metal en la ubicación de interés (10+242 a 10+272); hay un error en las fechas a las que se hace referencia en algunas fotos, la inconsistencia puede observarse comparando las 2 primeras y la última de este periodo

Marzo 2011

- Trabajos para instalar el colector de aguas pluviales (10+242 a 10+272)

Abril 2011

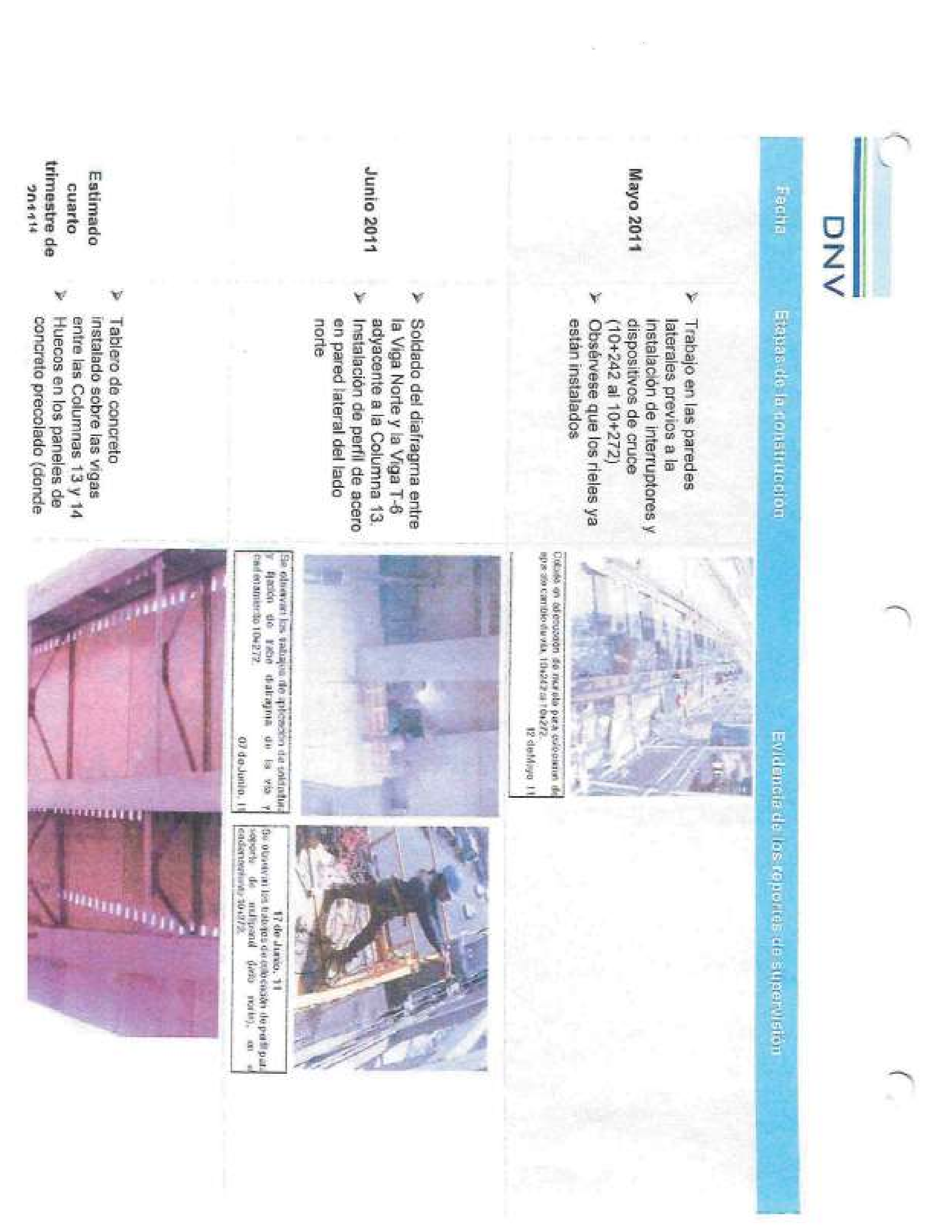
- Continúan los trabajos sobre el colector de aguas pluviales
- Construcción de pared lateral con perfil de acero en el área de trinchera (10+242 to 10+272)

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

T1148816-2021-SGIRPG-ACR-DFIIH_12 REV. 0
Enero 2022

73

Sin comentarios



DNV

Fecha	Etapas de la construcción	Evidencia de los reportes de supervisión
Mayo 2011	➢ Trabajo en las paredes laterales previos a la instalación de interruptores y dispositivos de cruce (10+242 al 10+272) ➢ Obsérvese que los rieles ya están instalados	Colado en adecuación de murete para colocación de equipo de cambio de vía, 10+242 al 10+272. 12 de Mayo 11
Junio 2011	➢ Soldado del diafragma entre la Viga Norte y la Viga T-6 adyacente a la Columna 13. ➢ Instalación de perfil de acero en pared lateral del lado norte	Se observan los trabajos de aplicación de soldadura y fijación de trabe diafragma de la vía y cadenamiento 10+272. 07 de Junio, 11 17 de Junio, 11 Se observan los trabajos de colocación de perfil para soporte de multipanel (lado norte), en el cadenamiento 10+272.
Estimado cuarto trimestre de 2011[14]	➢ Tablero de concreto instalado sobre las vigas entre las Columnas 13 y 14 ➢ Huecos en los paneles de concreto precolado (donde	

Sin comentarios

Sin comentarios

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

14 La fecha de la fotografía no pudo confirmarse. Sin embargo, con base en una fotografía similar, es probable que la foto haya sido tomada en el cuarto trimestre de 2011.

DNV

4.1.2.1 Ruta de la L12

4.1.2.1.1 Revisión Geotécnica

Como parte del trabajo realizado en la Fase 2, DNV revisó la información geotécnica disponible para el sitio del accidente del Metro para entender las condiciones de soporte de los cimientos, así como las condiciones generales de la subsuperficie en el área general. Los hallazgos de esta revisión se muestran en la Sección 3.3 del reporte de la Fase 2 (provisto en el Anexo A). Algunos hallazgos relevantes de dicha revisión se reproducen a continuación:

Con base en la zonificación de 2004 (que se encontraba en vigor cuando se diseñó la L12 del Metro), el sitio del accidente del Metro se encontraría dentro de la Zona III (zona de arcilla lacustre) aunque cerca del límite con la Zona II (zona de transición).

- Con base en el mapa más actualizado (2017), el sitio del accidente del Metro se encontraría dentro de la Zona II (Zona de Transición).
- Con base en la información revisada, la exploración geotécnica para la construcción de la L12 del sistema Metro de Tláhuac a Mixcoac se realizó a principios de 2001.
- Se reporta que la campaña de exploración geotécnica fue coordinada por la Dirección General de Construcción de Obras del Sistema de Transporte Colectivo (DGCOSTC), y desarrollada por la compañía "Geotec S.A. de C.V.".
- Se realizaron campañas de exploración geotécnica complementarias subsecuentemente por diferentes compañías con base en los cambios de alineación de la L12 y para complementar los resultados de estudios preliminares.
- En general, parece que las investigaciones geotécnicas se realizaron de forma consistente con los requerimientos de las Normas Técnicas de 2004.

4.1.2.1.2 Condiciones de la Subsuperficie Los Olivos – San Lorenzo Tezonco

Como parte de los trabajos de la Fase 2, DNV revisó el reporte del cálculo geotécnico de la sección elevada del puente elevado del Metro entre las Estaciones Olivos y San Lorenzo Tezonco.[15] Los hallazgos de esta revisión se muestran en la Sección 3.3 del reporte de la Fase 2 (provisto en el Anexo A). Algunos hallazgos relevantes de dicha revisión se muestran a continuación:

- Con base en la revisión de la documentación disponible, la caracterización de las condiciones de la subsuperficie y el desarrollo de los valores para los parámetros de diseño de la ubicación del accidente parecen haberse realizado de conformidad con las Normas Técnicas de 2004 para la Distrito Federal. Parece haberse recolectado información suficiente de la subsuperficie para

15 Memoria Geotécnica De Cálculo Del Tramo, Los Olivos - San Lorenzo Tezonco, Comprendido Entre Los Cadenamientos 10+322. [illegible] De La Línea 12 Del Sistema De Transporte Colectivo De La Ciudad De México

Cristina del Carmen Flores García Luna
Perito Traductor [illegible] autorizada por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo
Registro: SG-2020-436A

Sin comentarios

identificar los principales problemas geotécnicos para el diseño de los cimientos, así como para desarrollar soluciones de cimentación apropiadas para el área.

4.1.2.2 Obras de ingeniería civil – Desviaciones del Diseño y de los estándares de Diseño

Se realizó una revisión detallada de la construcción como parte del reporte del análisis estructural de la Fase 2 (ver Anexo A). Los detalles específicos asociados con la construcción de obras de ingeniería civil pueden encontrarse en el Anexo A, Sección 4.0 del reporte de la Fase 2. Comparando el diseño con las condiciones de cómo fue construido (as-built) del puente elevado, DNV observó las siguientes diferencias:

- **Pernos** – Se observaron diversos parches aparentes en la parte inferior del tablero de concreto que parecían encontrarse en ubicaciones de los huecos para los pernos que habían quedado mal alineados. Los paneles precolados se habían parchado durante la construcción y pudieron haber sido la fuente de intrusión de agua y deterioro del concreto al paso del tiempo. Diversas ubicaciones en las que la viga se separó de los paneles de concreto también indican que la colocación de los pernos de corte es inconsistente con los planos de diseño.

- **Marcos transversales** - Los marcos transversales de acero usados para el arriostramiento lateral de las vigas principales están hechos con perfiles angulares, cada uno elaborado con acero al carbono ASTM A36 con una sección transversal L3x3x3/8-pulgadas. Los dos perfiles angulares se unieron para formar miembros con una sección transversal en "T" y después se unieron para formar un marco transversal. El marco transversal se soldó después al refuerzo vertical de 1.3-cm (0.5-pulgadas) de espesor. Consistente con las observaciones visuales del sitio del accidente, el detalle de las ilustraciones del componente muestra los cordones superiores de los marcos transversales en contacto (y unidos) con el lado inferior de los patines superiores, mientras que los cordones inferiores están separados alguna distancia del patín inferior. Este detalle no es consistente con el estándar AASHTO, que requiere que los elementos de refuerzo estén unidos a los patines superiores e inferiores con este tipo de arreglo de vigas.

- **Concreto** – El concreto colado en el sitio que recubre al elemento precolado fue colocado en dos etapas de acuerdo con la explicación del Contratista en respuesta a la nota de inconformidad número 625, de fecha 8 de septiembre de 2010. La colocación del concreto en dos etapas lleva a la formación de una junta fría. DNV confirmó la presencia de una junta fría en la investigación petrográfica del concreto. La documentación revisada por DNV no especifican que estén permitidas las juntas frías. Por lo tanto, esta ejecución se desvía de la especificación. Obsérvese que esta junta fría es una interfase de transferencia de corte que es parte de la ruta de carga en la acción compuesta entre el concreto colado en el sitio, el concreto precolado y las vigas principales. AASHTO requiere que se proporcionen interfases de transferencia de corte con suficiente resistencia al corte preparando intencionalmente la superficie (es decir, desbaste de la superficie exponiendo el agregado grueso con amplitud mínima de 6 mm) y/o mediante la colocación de un refuerzo mínimo perpendicular al plano de la interfase. DNV no pudo verificar si la unión en frío cumple con los requerimientos de AASHTO ya que no se recibió ninguna información de diseño, o registros de estas actividades para poder confirmar si se cumplió o no

Sin comentarios

DNV

con los requerimientos. No cumplir con este requerimiento contribuiría con el debilitamiento de la acción compuesta del puente elevado.

4.1.2.3 Material Rodante

Una revisión detallada de la construcción del material rodante se presenta en el Anexo E, Sección E-1.2.1. Los principales hallazgos de la revisión son:

- No hay evidencia que sugiera que se contratara supervisión para el material rodante con ningún tercero que no fuera el STC e, igualmente, a DNV no se le proporcionaron reportes de inspección o supervisión por parte de STC (como reuniones, inspecciones o reportes periódicos), que no fueran los explícitamente referidos en el Anexo E, Sección E-1.2.1.
- En la documentación evaluada, DNV recibió evidencia que muestra las actividades de supervisión por parte del STC, así como evidencia que indica que CAF realizó la interfase durante actividades de diseño y construcción con la entidad del consorcio responsable de abastecer la telefonía del tren y la señalización abordo/a los lados de las vías (Alstom) para todas las actividades relacionadas con estos equipos. Sin embargo, no se encontró evidencia de las actividades de integración y gestión de las interfases vehículo – vía en aspectos relativos a la dinámica vehicular entre CAF y las entidades constructoras del consorcio, salvo en la fase de puesta en marcha, cuando el desgaste excesivo acelerado de componentes como rieles y ruedas comenzó a ser aparente.

4.1.2.4 Sistemas de Rieles

Una revisión detallada de la construcción del material rodante se presenta en el Anexo E, Sección E-1.2.2. Los principales hallazgos de la revisión son:

- Los organismos de certificación responsables de los sistemas electromecánicos, si bien establecieron que dichos sistemas eran seguros para ponerlos al servicio del pasajero, formalizaron recomendaciones que, en la mayor parte de los casos, se referían a la necesidad de realizar una monitorización y mantenimiento proactivo de dichos sistemas, incluyéndose componentes tales como: rieles, durmientes y sujeciones y geometría de vía.
- La implementación fallida de procesos, llevó a defectos post-instalación en componentes como rieles, durmientes y balasto, que agravó la compatibilidad vehículo-vía y contribuyó a un desgaste acelerado derivando en actividades de solución de problemas como condiciones de operación cambiantes (reducción en la velocidad de operación) y mayor mantenimiento en los componentes de las vías y los vehículos (re-perfilado de llantas).
- Todo lo anterior derivó en la necesidad de realizar actividades mayores de rehabilitación en la L12 durante 2015 para aliviar la compatibilidad del sistema de rieles con el material rodante. Esto implicó la realización de trabajos pesados sobre los existentes sistemas de rieles y elementos de la infraestructura.

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

Sin comentarios

DNV

4.1.2.5 Modificaciones al Material Rodante y a los Sistemas de Rieles después de la Puesta en Marcha

Como se describió en las secciones anteriores, el periodo de tiempo de octubre 2012 a marzo de 2014 se caracterizó por el desgaste anómalo que derivó tanto en los componentes de los sistemas de vías como en las llantas del material rodante, debido a una interfase deficiente entre el material rodante y las vías, originado por un diseño de vías con numerosas curvas con radios reducidos (menos de 300m) con transición ajustada. Esto tuvo una fuerte influencia sobre las modificaciones subsecuentes que de hecho se realizaron:

- CAF usó originalmente perfiles de ruedas X.06.00126.01 (similares al perfil de llanta de la Línea A). Debido al desgaste y problemas relacionados que eran aparentes en el patín de la llanta en 2013, CAF propuso un nuevo perfil de llanta X.06.00445_1).
- Se reemplazó un gran número de durmientes (10.664) dentro del periodo octubre 30 de 2012 a Agosto 29 de 2014, haciendo que cambiara la geometría de la vía.
- Los perfiles de velocidad en la operación de la L12 y los regímenes de re-perfilado de las llantas fueron cambiados como mitigación al desgaste excesivo antes del cierre parcial de la línea. La frecuencia en el re-perfilado de las llantas aumentó (de 135.000km a 40.000km). Esta es la sección recolectada de la línea del tiempo que se muestra en la Figura 19:

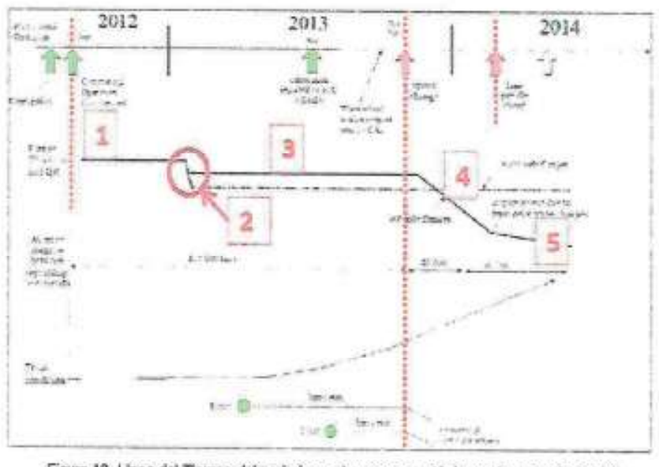


Figura 19- Línea del Tiempo del período en el que se reportó desgaste anómalo. [1064]

Como resultado de la investigación realizada por SYSTRA, se emitieron diversas recomendaciones de potencial implementación que afectaban tanto a los sistemas de rieles como al material rodante. Dichas recomendaciones se listan a continuación [1064]:

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

Sin comentarios

DNV

Sistema de rieles – vía y componentes de la vía:

- Reemplazar el riel 115RE inicialmente puesto en marcha por riel UIC 60 (más duro y más pesado) para reducir el desgaste ondulatorio en ubicaciones con radio reducido. Si se realiza el cambio sugerido, los durmientes actuales y sus sujetadores deberán ser reemplazados por razones de compatibilidad.
- Reducir el peralte y la deficiencia de peralte en curvas con radio menor a 350m. El peralte desplegado originalmente (160 mm) significó capas de balasto muy gruesas.
- En las vías secundaria y del depósito se hizo una recomendación para aumentar el ancho de la vía e implementar sistemas de lubricación para las vías.
- Eliminar las rocas de balasto sedimentarias y usar sólo rocas de balasto duras, especialmente en las curvas con radios reducidos.

Material rodante:

- Realizar un estudio detallado para la modificación de suspensiones primarias y secundarias para la optimización de la interfase llanta/riel.
- Cambiar los ajustes del sistema de lubricación del patín de la llanta para garantizar la lubricación en la ubicación deseada de la llanta y con la periodicidad/frecuencias correctas.

Se adjudicó el contrato para la rehabilitación profunda de la línea (sistema de rieles) a COMSA en enero de 2015 y se realizó en el mismo año. La porción del puente elevado de la línea se reabrió el 29 de noviembre de 2015.

DNV ha recibido y analizado evidencia documental relativa los trabajos de rehabilitación conducidos por COMSA entre Enero 2015 y Mayo 2016. Las conclusiones de este análisis se enumeran a continuación:

- Al margen de la afectación al servicio, la duración total de los trabajos de rehabilitación fue de enero de 2015 hasta mayo de 2016.
- El alcance de estos trabajos incluyó:
  - Sustitución de durmientes agrietadas o rotas en la sección en viaducto.
  - Reparación o sustitución de soldaduras aluminotérmicas de riel tipo 115 RE en aquellos casos en los que la geometría se encontrase fuera de tolerancia.
  - Remplazo de soldaduras que muestran defectos metalúrgicos.
  - Sustitución de sujeciones de vía.
  - Liberación de tensiones en carril soldado.
  - Nivelación de vía.
  - Amolado de riel.
  - Sustitución de balasto de origen calcáreo y basáltico por balasto tipo C-4 en 13 curvas.
  - Sustitución de riel tipo 115 RE en las secciones en curva por riel tipo UIC 60 con tratamiento térmico (350 HT).
  - Sustitución de durmientes PRET/ITISA por durmientes tipo S354.
  - Utilización de sujeciones tipo VISA.
  - Modificación del peralte en curvas específicas.

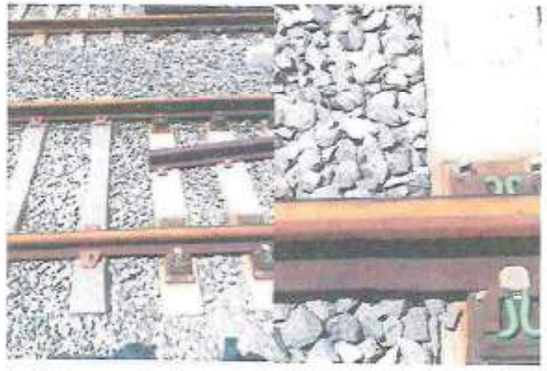
Cristina del Carmen Flores García
Perito Traductor de Inglés autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo
Registro: SG-2020-435A

Sin comentarios

- Retirada del carril de guarda en curvas de radio reducido (R≥200m).
- Modificación de las curvas 1 y 2 en Tláhuac (R<190m).

- El foco del análisis realizado por DNV ha sido comprobar las afecciones que los trabajos de rehabilitación pudieran haber provocado sobre los componentes estructurales de la obra civil.
  - Se realizaron diferentes trabajos de rehabilitación en la interestación Olivos – Tezonco; entre ellos:
    - Suministro e instalación de aisladores para riel tipo 115 RE.
    - Montaje, estabilización y nivelación de vía.
    - Sustitución y/o rehabilitación de durmientes.
    - Revisión y ajuste de aparatos de dilatación.
    - Retirada, suministro, refino y limpieza de balasto.
    - Suministro y comprobación de soldaduras aluminotérmicas.
    - Realización de actividades específicas en áreas de maniobras.
    - Amolado de riel.
  - Para los trabajos anteriores, se constata la utilización de maquinaria pesada en la interestación. Las cargas asociadas a esta maquinaria no pudieron ser determinadas a la vista de la evidencia presentada.

Durante la investigación in situ realizada el 19 de mayo de 2021, DNV verificó visualmente que dentro de las estaciones Olivos – San Lorenzo Tezonco (el área afectada por el accidente) y la sección de la interestación entre San Lorenzo Tezonco – Periférico Oriente una parte predominante del balasto era de roca de naturaleza dura, y que los cambios sugeridos en la parte superior (reemplazo del tipo de riel, durmientes y sujetadores) habían sido implementados en una curva que cumplía con los criterios de radio reducido como se muestra en la Figura 20.



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

Sin comentarios

Figura 20- Fotografías que muestran el cambio en el perfil del riel, tipo de durmientes y sistemas de sujeción (PK10+800).

4.1.3 Inspección, Mantenimiento y Reparación de las Obras de Ingeniería Civil

El manual de mantenimiento de la L12 fue emitido en octubre de 2012 por el Consorcio y entregado formalmente a la STC el 08 de Julio del 2013, lo anterior de acuerdo con el acta de entrega definitiva de esta misma fecha. Los objetivos del documento fueron definir las actividades de inspección y mantenimiento para obras de ingeniería civil en la L12, así como establecer los procedimientos que debían seguirse en caso de eventos extraordinarios como la actividad sísmica. El manual de mantenimiento aplica a la estructura subterránea, a la estructura a nivel de superficie y a la estructura elevada de la L12. Para el mantenimiento de la estructura elevada el manual de mantenimiento cubre lo siguiente:

- Descripción general de los componentes que conforman las estaciones, secciones elevadas y andenes.
- Descripción detallada de las instrucciones que deben implementarse en las estaciones, secciones elevadas y andenes.
- Descripción detallada de las acciones preventivas y correctivas que deben implementarse en estaciones, secciones elevadas y andenes.

El mantenimiento de los elementos estructurales de metal se describe en la Sección 6 del manual e incluye lo siguiente:

- Marcos estructurales rígidos en el cuerpo principal y en los pasillos de las estaciones
- Marcos rígidos usados como soporte en el tramo
- Vigas en las vías y bajo la plataforma
- Cerchas del sistema de acceso

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

Sin comentarios

- Vigas y vigas secundarias del sistema de piso y accesos y pasillos
- Apuntalamiento transversal en vigas de las vías o de los sistemas de techos
- Elementos secundarios como el marco de soporte de pasillos y equipo de protección contra incendios

4.1.3.1 Inspecciones

Conforme al manual de mantenimiento para la L12, las vigas metálicas deberían inspeccionarse periódicamente respecto a su nivel de deflexión, integridad de los miembros y de las soldaduras, en busca de una señal de daño o falla.[1063] Adicionalmente, debían inspeccionarse los miembros estructurales (es decir, marcos transversales) respecto a su verticalidad, nivel de deflexión y evidencia de daño en las conexiones (es decir, soldadura o conexiones roscadas). Para monitorear la verticalidad de los marcos estructurales rígidos y las deflexiones en elementos horizontales, es necesario realizar una inspección topográfica. Los desplazamientos laterales de los marcos y las deflexiones de la viga principal debían correlacionarse con los desplazamientos verticales de los cimientos.

La Tabla 12 resume la deflexión permisible en cada tipo de elemento según lo define el manual de mantenimiento. Para las vigas del puente elevado y apartadero, la deflexión máxima permisible con cargas vivas es de Longitud/1000. Para el tramo de 30-m de largo entre las Columnas 12 y 13, la deflexión máxima permisible sería de 30 mm (1.18 pulgadas) [1063]. Esta inspección debía realizarse cada dos años. Cabe señalar que no existe un valor de deflexión permisible especificado para cargas muertas; sin embargo, el tramo elevado fue diseñado con una contraflecha neutral (es decir, sin deflexión positiva o negativa). Las inspecciones de la integridad de los elementos de la estructura principal debían realizarse trimestralmente el primer año posterior a la terminación, semestralmente el segundo año después de la terminación, y después anualmente en los años subsecuentes. DNV no recibió datos de dichas inspecciones entre 2012 y 2019 y no parece que dichas inspecciones se hubieran realizado.

Tabla 12- Resumen de elementos y su deflexión permisible conforme al manual de mantenimiento de la L12.[1063]

Tipo de Elemento	Deflexión Permisible
Marcos rígidos en soportes, cuerpo principal y pasillos angostos	0.4% de la altura del marco
Vigas del puente elevado y el apartadero*	Longitud/ 1000
Vigas debajo de la Plataforma y sistemas de piso	Longitud/ 240
Cerchas del techo	Longitud/ 180

*Deflexión permisible debido a cargas vivas

Se realizó una serie de inspecciones por parte de ISSA en 2019 para mantenimiento y fueron iniciadas por la administración recién designada del GCM [1462-1561, I-4]. El objetivo de dicha evaluación fue crear una línea base de la condición de la L12 [I-4]. Estas inspecciones evaluaron los factores geotécnicos (condiciones del suelo y hundimientos) y el impacto potencial a L12 debido al asentamiento diferencial del suelo en las zonas de transición del lecho de roca a suelos más blandos, así como las condiciones de las obras de ingeniería civil de la L12 (condición del tramo elevado). Como parte de estas inspecciones, se

Perito Traductor de Inglés autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Asturias
Registro: SG-2020-435A
62

Sin comentarios

evaluaron los desplazamientos de las vigas en las ubicaciones de contacto con las columnas del puente elevado utilizando dianas de topografía colocadas en las vigas a cada lado de las columnas. Las dianas de topografía ubicadas en las vigas se han utilizado para obtener coordenadas horizontales (X, Y) para evaluar el desplazamiento relativo entre las vigas, mientras que aquellas ubicadas en las columnas se utilizaron para evaluar los cambios de elevación entre los períodos de monitoreo. Como resultado de esta evaluación, no se observaron asentamientos en las Columnas 12 y 13; sin embargo, no se realizaron mediciones en el tramo medio [1485]. Tal y como se menciona arriba, las deflexiones verticales deben ser medidas cada dos años, de acuerdo con el manual de mantenimiento. Dentro de los documentos de ISSA, no hubo hallazgos o recomendaciones derivadas de la evaluación de 2019 relacionadas con la condición de las Columnas 12 y 13. Los esfuerzos remediales de otras porciones de la L12, con base en las recomendaciones de ISSA fueron interrumpidos por la pandemia.

Las inspecciones relevantes al ACR incluyeron inspecciones visuales e inspecciones topográficas de las columnas cerca del sitio del Accidente en la L12 [1463-1485]. Con base en una revisión de los documentos de ISSA, DNV tiene las siguientes observaciones:

- Las mediciones topográficas sobre el periodo de prueba (noviembre a diciembre de 2019, normalmente), pueden ser atribuidas a un grado de error en las mediciones. La variación identificada no puede explicarse mediante ningún proceso geotécnico o geológico.
    - Se observó un asentamiento de las columnas en la sección elevada de la L12 con el mayor desplazamiento a lo largo de las siguientes Estaciones: Nopalera-Olivos- San Lorenzo Tezonco-Periférico. Sin embargo, ISSA no hizo recomendaciones a partir del estudio que se realizó en un periodo de dos meses. Estas recomendaciones no incluyeron información específica de las Columnas 12 y 13 o de las otras columnas entre las estaciones Olivos y San Lorenzo Tezonco.
- Las conclusiones generales de los reportes de ISSA fueron que las tendencias en el comportamiento no eran concluyentes debido al reducido muestreo y a que los estudios se habían realizado en un periodo de tiempo corto (dentro de los meses de Nov 19 a Dic 19, en muchos casos).

Además de las inspecciones rutinarias, deberían haberse realizado inspecciones más detalladas por un especialista que representara a la dirección de ingeniería civil del STC en los casos de eventos extraordinarios. Estos estudios se requieren cuando un temblor alcanza o excede una magnitud de 7.0 o si se presenta un accidente que pueda haber causado daños a los elementos estructurales. No se reportaron accidentes para esta sección de la vía; sin embargo, si hubo varios temblores que se discutirán en la Sección 4.1.3.1.1.

4.1.3.1.1 Historial de Temblores e Inspecciones Asociadas

Como parte de la revisión de la documentación, DNV revisó los reportes de evaluación del Sistema Metro posteriores a los temblores que fueron preparados por el Sistema de Transporte Colectivo (STC) posterior

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

Sin comentarios

los temblores de 2017, 2018 y 2020. Los reportes revisados incluyeron la evaluación de las porciones de la L12 cercanas al sitio del accidente como se resume a continuación.

4.1.3.1.1.1 SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017:

Personal del STC fue movilizado a diferentes áreas del metro para realizar la inspección de daños el 19 de septiembre de 2017, inmediatamente después del temblor. El STC documentó las condiciones en Nopalera (siguiente estación hacia Tláhuac desde la Estación Olivos) y la Estación Periférico Oriente (siguiente estación hacia Pueblo Culhuacán desde la Estación San Lorenzo Tezonco) pero no se reportaron observaciones específicas sobre las Estaciones Olivos o San Lorenzo Tezonco para la sección de la L12 entre las dos estaciones en las que ocurrió el accidente. [1563]

El STC reportó impactos del temblor en la estación Nopalera incluyendo el descarrilamiento de 2 trenes y grietas observadas en las columnas de concreto y en el pavimento fuera de la estación. En la estación Periférico Oriente, se reportaron vidrios rotos en los accesos norte y sur de la estación y se reportó que algunos edificios de los alrededores habían colapsado.

Con base en la revisión del reporte del STC, no hubo indicación de que el área cercana al lugar del accidente de la L12 fuera significativamente impactada por el temblor del 19 de septiembre de 2017. A partir de una revisión de los registros históricos de los temblores para el área del accidente, DNV observó que el temblor del 19 de septiembre de 2017 parece haber sido la sacudida más fuerte en el área del accidente de la L12 desde su construcción.

4.1.3.1.1.2 SISMO DEL 16 DE FEBRERO DE 2018:

Después del temblor, personal del STC inspeccionó la sección de la L12 entre las estaciones de Los Olivos y Nopalera y reportó que las columnas que soportaban las vigas no parecían haber sido afectadas por el temblor. [1564]

Con base en la revisión del reporte del STC, no hay indicación de que el área del accidente de la L12 hubiera sido impactada significativamente por el Temblor del 16 de febrero de 2018.

4.1.3.1.1.3 SISMO DEL 23 DE JUNIO DE 2020:

El STC preparó una inspección más detallada del sistema Metro posterior al temblor del 23 de junio de 2020. [1565] La inspección incluyó observaciones en las Estaciones San Lorenzo Tezonco y Los Olivos, así como en las secciones entre las dos estaciones que incluyeron la ubicación del accidente. El objetivo establecido para la inspección de las secciones de infraestructura fue evaluar los componentes de las estructuras, identificar riesgos asociados con la interacción con la estructura y los impactos en el medio ambiente.

La inspección incluyó una lista de verificación de la evaluación post-sísmica para cada ubicación que consideró lo siguiente:

- Identificación de la sección y la estructura

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

Sin comentarios

DNV

- Problemas geotécnicos
- Aspectos estructurales
- Daños en instalaciones municipales
- Daños a instalaciones adyacentes

La inspección incluyó la revisión de elementos que incluían columnas, cimientos, bases de las catenarias, puente elevado, paneles de concreto, juntas de expansión sísmica y cabezales, clasificando los resultados de la inspección en las siguientes tres (3) categorías:

1. Reparaciones correctivas requeridas
2. Monitoreo adicional requerido
3. Acción correctiva no requerida

Con base en los resultados de la inspección, el STC concluyó que las estaciones no habían sido impactadas por el evento sísmico y clasificó a las estaciones San Lorenzo Tezonco y Los Olivos al igual que a la sección entre las dos estaciones (que incluye la ubicación del accidente) como que no requerían acción correctiva (Categoría 3). Los reportes de evaluación parecen ser consistentes con los requerimientos de inspección que se señalan en el manual de mantenimiento de la L12, que especifica la inspección visual de los talleres de Tláhuac y de toda la línea después de temblores de magnitud mayor en escala Richter a 6.5 y 7. (Obsérvese que la magnitud de la escala Richter está desactualizada y que ha sido reemplazada en la ingeniería moderna de los temblores por Magnitud de Momento). La escala Richter se utiliza aquí para facilitar la comparación con el valor anotado de 7.0 Richter en el manual de mantenimiento de L12.

4.1.3.1.2 Histórico Adicional de Imágenes y Escaneos

Como parte del reporte de la Fase 2 (ver Anexo A), DNV revisó el histórico de fotografías y videos del sitio del accidente del Metro para identificar cualquier evidencia de daños preexistentes o movimientos que pudieran aportar elementos a la secuencia de eventos que finalmente llevó a la falla. Una gran parte de la sección original (Sección 3.2) del reporte de la Fase 2 se reproduce a continuación. .

La información disponible incluyó videos del sitio del accidente que fueron adquiridos de una cámara de seguridad de la calle (C5), secuencias de video tomado por drones adquiridas durante la inspección de 2019 a las Columnas 12 y 13 posterior a las reparaciones realizadas a lo largo de la línea y que resultaron de los daños derivados del temblor de 2017, e imágenes de Google Street View que fueron adquiridas en 2019 y 2020.

La Figura 21 contiene tomas fijas del video adquirido de la Cámara del C5. El brillo y el contraste del video fueron ajustados para iluminar mejor los componentes estructurales del sitio del accidente. Se construyó un modelo tridimensional (3D) como parte del modelado computacional y fue girado y sobrepuesto en la misma orientación que la secuencia de la cámara de video. La figura contiene dos tomas fijas. La toma superior es justo antes del inicio del colapso mientras que la toma inferior es aproximadamente 0.5

Cristina del Carmen Flores García Luna
Perito Traductor
SG-2020-436A

Sin comentarios

DNV

segundos después del inicio del colapso. Se dibujó una línea punteada en gris en las tomas fijas para identificar la ubicación del patín inferior de la Viga Norte. Es claro al comparar el video con el modelo 3D que la Viga Sur no puede verse desde esta perspectiva. En el marco inferior, se añadió una segunda línea punteada en rojo para reflejar la ubicación del patín inferior de la Viga Norte en este momento del tiempo. Con base en esta secuencia, el colapso parece haber iniciado en el tramo central, cerca o en la ubicación en la que la Viga T-6 se une a la Viga Norte. La Figura 22 es una toma fija de aproximadamente 1 segundo después de que iniciara el colapso. Ahora la Viga Sur se encuentra en el cuadro de la toma y puede verse cayendo en lo que parece ser una distancia similar del piso que la Viga Norte, sugiriendo que la falla de las vigas Norte y Sur ocurrieron casi al mismo tiempo.

En diciembre de 2019 se realizó una inspección de los pilares de concreto y de cabezal usando drones a control remoto que capturaron fotografías y video de cada columna. La inspección se realizó para evaluar la condición de las porciones visibles de la estructura para evaluar el desempeño y para observar si había posibles daños latentes que pudieran haber ocurrido como resultado del temblor de 2017. La Figura 23, Figura 24, y Figura 25 son tomas del video capturado durante la inspección. La Figura 23 muestra el lado norte, entre las Columnas 12 y 13; la Viga Norte y la Viga T-6 específicamente. Se añadieron líneas rectas a la imagen para ilustrar la significativa deflexión negativa asociada con la Viga Norte y la Viga T-6. Se dibujaron líneas entre el final del patín inferior de cada viga. La distancia entre esta línea y el patín inferior corresponde a la cantidad de deflexión. Se estima que la deflexión es mayor que el espesor del patín inferior de la Viga Norte en el centro del tramo, que es de 3 pulgadas(7.6 cm). Este es un valor mínimo, ya que el cabezal de la Columna 12 bloquea la terminación de la Viga Norte, lo que cambiaría la línea roja e indicaría una deflexión más negativa. Debe observarse que el tramo elevado fue diseñado para tener una contraflecha que dé lugar a una deflexión neutral para las cargas muertas. Adicionalmente, existe una rotación notable del soporte voladizo ligero que se une a T-6. Se estima que esta rotación es de aproximadamente 3 grados. La Figura 24 muestra la Viga Sur entre las Columnas 12 y 13. Similar al lado norte, se observa la deflexión negativa; sin embargo, la cantidad parece ser menor a la que se identifica en las Vigas Norte y T-6. Con propósitos de comparación, la Figura 25 muestra el lado sur del tramo entre las Columnas 13 y 14; un tramo al Este del sitio del accidente. De forma similar, se dibujó una líneas entre la terminación del patín inferior de la viga. No hubo deflexión negativa observable asociada con este miembro. Estas observaciones asociadas con la Viga Norte se encuentran en conflicto con las inspecciones realizadas por el STC después de los temblores de 2017 y 2018. Como se anotó antes, dichas inspecciones no identificaron ninguna evidencia visual reportable en las obras de ingeniería civil de la L12 en el área del sitio del accidente.

También se revisaron imágenes de Google Earth. Las imágenes recolectadas del lado sur del sitio del accidente fueron adquiridas en Agosto de 2019, mientras que las imágenes de lado norte fueron adquiridas en Marzo de 2020. Imágenes que contenían un lado corto de la calle que conecta los lados norte y sur fueron adquiridas en julio de 2019.

La Figura 26 es una captura de Google Earth del lado sur (Agosto 2019) del sitio del accidente. Puede observarse una separación entre los paneles de concreto precolado, así como una mancha de humedad y eflorescencia. La secuencia de los drones en la Figura 23 mostró una deflexión negativa significativa en el tramo; es probable que dicha deflexión evitara el drenaje apropiado del agua, resultando en la mancha

SG-2020-435A
88

La normatividad de la Ciudad de México, establece que para un claro de 30 metros (longitud que tenía el tramo colapsado entre las columnas 12 y 13), la deflexión tolerable podría llegar hasta 11.73 centímetros.

4. ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO

4.1. DESPLAZAMIENTOS

En las edificaciones comunes sujetas a acciones permanentes o variables, la condición del estado límite de servicio en términos de desplazamientos se cumplirá si no exceden los valores siguientes:

a) **Un desplazamiento vertical en el centro de trabes en el que se incluyen efectos a largo plazo, igual al claro entre 240**; además, en miembros en los cuales sus desplazamientos afecten elementos no estructurales, como muros de mampostería, que no sean capaces de soportar desplazamientos apreciables, se considerará como estado límite a un desplazamiento vertical, medido después de colocar los elementos no estructurales, igual al claro de la trabe entre 480. Para elementos en voladizo los límites anteriores se duplicarán.

b) …

Para el caso de un tramo con claro de 30.00 m a ejes de columnas con 28.15 de claro libre, el desplazamiento vertical permitido sería:

$$\delta_{perm} = \frac{2,815cm}{240} = 11.73\ cm$$

de humedad y eflorescencia en esta ubicación. Dentro de la misma captura, se modificaron el brillo y el contraste de la imagen (Figura 27) para mostrar las áreas locales de deformación o alteración del atiezador longitudinal de la Viga Norte. La condición de carga que habría causado este tipo de deformación es un movimiento lateral de la Viga Norte hacia la Viga Sur. La Figura 28 es una fotografía que muestra la misma ubicación después del colapso. La deformación es evidente en el refuerzo longitudinal y es adyacente a las dos deformaciones identificadas en los patines superiores de las Vigas Norte y T-6.

La Figura 29 es una captura de pantalla del sitio del accidente tomada de Google Street View desde el lado norte (marzo de 2020). Puede verse el marco transversal del centro (Marco transversal 3) arqueándose hacia el Este, en dirección de la flecha verde que se muestra en la imagen. La Figura 30 es una fotografía que muestra el mismo marco transversal después del colapso. Ahora el marco transversal está deformado en la misma dirección (hacia el Este) que se muestra en la Figura 29.

La presencia de pandeo en el atiesador longitudinal y el pandeo en el marco transversal central indican que las condiciones que llevaron al colapso están relacionadas con el movimiento lateral de la Viga Sur, y posiblemente de la Viga Norte. En otras palabras, las Vigas Norte y Sur se cargaron de tal manera que se estuvieron moviendo una hacia la otra antes de la falla.

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

Sin comentarios

DNV

Figura 21- Fotogramas extraídos de la secuencia en video de una cámara de seguridad en la calle (C5) aproximadamente a las 22:11:15 del 3 de mayo de 2021. El marco superior se encuentra justo antes del inicio del colapso y el marco inferior aproximadamente 0.5 segundos después.

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

Sin comentarios

Figura 22- Fotograma extraído de la secuencia en video de una cámara de seguridad en la calle (C5) aproximadamente a las 22:11:15 del 3 de mayo de 2021, aproximadamente 1 segundo después del inicio del colapso.

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

Sin comentarios

DNV

Figura 23- Fotograma adquirido de una secuencia en vídeo de una inspección por drones realizada en diciembre de 2019 que muestra una importante deflexión negativa de la Viga Norte y de la Viga T-6 entre las Columnas 12 y 13.

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

Sin comentarios

DNV

Figura 24- Fotograma adquirido de una secuencia en vídeo de una inspección por drones realizada en diciembre de 2019 que muestra la deflexión negativa de la Viga Sur entre las Columnas 12 y 13.

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

Sin comentarios

Figura 25- Fotograma adquirido de una secuencia en video de una inspección por drones realizada en diciembre 2019 que no muestra deflexión observable en la viga del lado sur del tramo entre las Columnas 13 y 14; un tramo al Este del sitio del accidente.

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

Sin comentarios

DNV

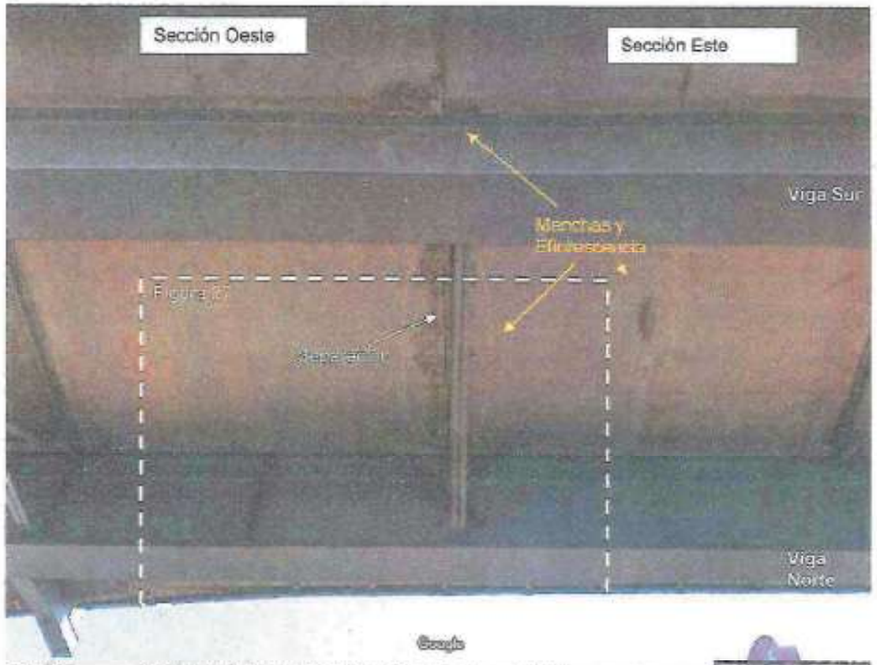


Figura 26- Captura de pantalla tomada de Google Street View (agosto 2019) que muestra una separación entre el concreto precolado, mancha de humedad, y eflorescencia en la ubicación de la falla.

Cristina del Carmen
Perito Traductor
de Inglés autorizado por
el Tribunal Superior de
Justicia de Hidalgo
Registro:
SG-2020-436A
Flores García Luna

Sin comentarios

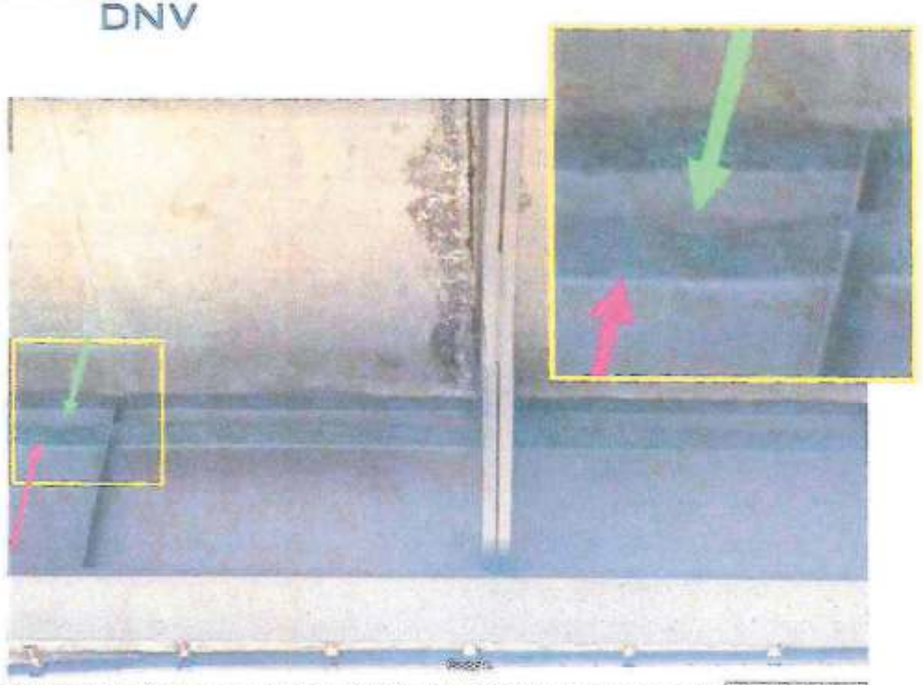


Figura 27- Captura de pantalla tomada de Google Street View (agosto 2019) que muestra las áreas de deformación a lo largo del atiesador longitudinal en la Viga Norte. Nota: Se ajustó el contraste y el brillo de la imagen original para mejorar las áreas obscuras. área indicada en la Figura 26.

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

Sin comentarios

DNV

Figura 28- Fotografía que muestra las ubicaciones de la deformación principal en la Viga Norte y en la Viga T-6 de la Sección Oeste, en relación con la deformación anterior capturada por Google Street View en agosto de 2019, refiérase a la Figura 27.

Figura 29- Captura de pantalla tomada de Google Street View (marzo 2020) que muestra el marco transversal central (Marco transversal 3) que parece haberse doblado (arqueado) hacia la Columna 13.

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

La SGIRPC en varias ocasiones solicitó a DNV no usar imágenes de Google Street View como evidencia, pues los términos de servicio de Google mencionan que “puede que las con- diciones reales del sitio difieran de los resultados de los mapas y del contenido por lo que el usuario es responsable en todo momento de su conducta y las con- secuencias de esta”.

Google

3. **Condiciones reales: asunción de riesgos.** Al utilizar los datos de mapas, tráfico, indicaciones y otro contenido de Google Maps/Google Earth, puede que las condiciones reales difieran de los resultados de los mapas y del contenido, por lo que el usuario deberá aplicar su propio criterio y utilizar Google Maps/Google Earth bajo su propia responsabilidad. El usuario es responsable en todo momento de su conducta y las consecuencias de esta.

Figura 30- Fotografía de la ubicación de la falla que muestra el cordón superior del Marco transversal 3 que se arqueó en la misma dirección, hacia la Columna 13, como el que se muestra en la Figura 29.

4.1.3.2 Mantenimiento y Reparación de Obras de Ingeniería Civil

No se cuenta con registros de mantenimiento o reparación de los componentes de concreto o metálicos utilizados en la ingeniería civil que fueran proporcionados a DNV para la sección de vías entre las Columnas 12 y 13 desde 2012 y hasta la fecha del accidente en 2021.

4.1.3.3 Mantenimiento y Reparación de Material Rodante

Una revisión detallada del mantenimiento y reparación del material rodante se presenta en el Anexo E, Sección E-1.3.1. Los hallazgos principales de la revisión son:

- Aunque los documentos entregados a DNV son parciales, a través de la evaluación de estos y de los hallazgos obtenidos de las entrevistas, puede concluirse que las actividades de mantenimiento del material rodante se realizan con regularidad.
- DNV no tiene evidencia adicional sobre cambios, que no sean los del perfil de las llantas, que se hayan realizado en los subsistemas del material rodante o en sus componentes desde después de la puesta en marcha y durante el periodo de operación del material rodante, y hasta la fecha.

4.1.3.4 Mantenimiento y Reparación de los Sistemas de Rieles

Una revisión detallada del mantenimiento y reparación de los sistemas de rieles se presenta en el Anexo E, Sección E-1.3.2. Los principales hallazgos de dicha revisión son:

Cristina del Carmen Flores García
Traducción del inglés autorizada por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo
Registro
SG-2020-435A

Sin comentarios

- Existió documentación técnica e instrucciones de soporte para el mantenimiento de los sistemas de rieles (componentes relacionados con la vía) aún antes de la puesta en marcha de la línea.
- DNV no puede determinar si estuvieron disponibles o no para el STC, como la entidad de operación/mantenimiento al inicio de las operaciones (puesta en marcha). Esto tiene un impacto sobre la preparación del STC para atender las actividades de mantenimiento que eran, como lo mencionan las entidades de certificación, críticas para la operación de la línea
- Entre 2012 y 2014, se detectó desgaste excesivo de los sistemas de vías lo que detonó una investigación por parte de SYSTRA y, a su vez, una rehabilitación profunda de la línea. Después de esto, Systra produjo una versión actualizada del manual y el STC contrató actividades sistemáticas de mantenimiento con TSO [1721-1729].

Existen registros que muestran la planeación y ejecución de actividades de mantenimiento en las vías desde marzo de 2018, mostrando altos niveles de cumplimiento, lo que es consistente con las observaciones en campo de la sección de vía Olivos – San Lorenzo Tezonco, conforme a la inspección realizada por DNV en mayo de 2021.

4.1.4 Operación de la L12

Un estimado conservador del número total de días por año de operación se muestra en la Figura 31. Las operaciones de la L12 arrancaron a finales de 2012. La línea operó durante todo 2013, pero los esfuerzos de rehabilitación y nueva puesta en marcha en 2014 y 2015 resultaron en un total de 103 días de operación en un periodo de dos años. Los esfuerzos de rehabilitación y nueva puesta en marcha se asociaron con el desgaste excesivo de las llantas (ver Sección 4.1.2.4 sobre los detalles de las modificaciones). No se observaron otras interrupciones operacionales en la documentación entregada a DNV, aunque se asume que el tren corrió a su capacidad total hasta el Accidente en la L12. El estimado conservador del número total de días de operación es de 2,476 días (6.8 años).

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

Sin comentarios

Figura 31- Gráfica de barras que muestra el estimado conservador del número de días de operación con base en las actividades conocidas.

Los programas de servicios de la L12 para 2019 y 2020 [1783] fueron entregados y se muestran en la Tabla 13. Como se muestra, el número de viajes redondos totales no cambió entre 2019 y 2020. Dado que la demanda de servicios normalmente aumenta al paso del tiempo ya que se genera demanda y es capturada por otros aspectos del transporte público, un estimado conservador del número total de viajes redondos puede estimarse extrapolando el mismo programa de servicio de 2019 y 2020 a los años previos. Al hacerlo, puede estimarse un escenario conservador del número total de trenes atravesando el segmento afectado de la vía.

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

Sin comentarios

Tabla 13- Programa de servicio de la L12 para 2019 y 2020 mostrando servicio en días laborales, sábados, domingos y días festivos.

Año	Número de coches por tren	Días de la semana			Sábado		Domingos / Días Festivos	
		Trenes		Viajes Redondos	Trenes	Viajes Redondos	Trenes	Viajes Redondos
		Hora Pico	Hora Valle					
2019	7	29	24	314	22	245	20	212
2020	7	29	24	314	22	245	20	212

Obsérvese que una Vuelta comprende el viaje de ida y de Vuelta; entonces, el número de viajes por año a través del segmento afectado de vía fue de 628 (71.50% de todos los viajes), 490 (14.25% de todos los viajes), y 424 (14.25% de todos los viajes) para días laborales, sábados y domingos/días festivos, respectivamente.[16] Combinando estos estimados con el número total de días operacionales de la L12, el estimado conservador del número total de recorridos a lo largo del segmento de vía afectado es de 1,436,027 recorridos (o 1.4 millones de recorridos). Debe observarse que un recorrido incluye a todo el convoy formado por siete coches. Esto significa que siete coches pasarían por la sección afectada de la vía del puente elevado en cada recorrido.

El documento "*Anexo 1 a los términos de referencia para el proyecto integral de la línea 12 Tláhuac-Mixcoac, del Sistema de Transporte Colectivo*", requiere que el proyecto sea implementado considerando un tiempo de vida OPEX de 50 años. La Sección 7.1 del documento mencionado expande las características operacionales que deben considerarse en el proyecto en términos del intervalo de diseño (90sg), velocidad comercial (35km/h) y otras especificaciones operacionales. En términos de ciclos de servicios, el máximo para la operación diaria es de alrededor de 19.5 horas. La distancia promedio que debe recorrer un convoy por año es de 150,000km. Si el número total de recorridos se convierte en km recorridos usando la distancia total de la línea (alrededor de 24km) y a su vez la distancia total se distribuye entre la flotilla existente (30 trenes) considerando la distancia promedio convoy-año, resultaría 7.66 años de operación (asumiendo el caso conservador en el que el mismo programa de servicio sea utilizado desde el inicio de la operación). Esto es consistente con el total de tiempo transcurrido desde que la L12 se puso en marcha (8.51 años) considerando el tiempo muerto debido a el desgaste y a la rehabilitación.

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

16 No se consideraron los días festivos de los bancos en los estimados y su inclusión solo resultaría en un cambio menor en el número total de días.

Sin comentarios

5.0 ANÁLISIS DE CAUSAS DE RAÍZ TÉCNICO

5.1 Identificación y Análisis de Barreras

DNV evaluó la amenaza de la pérdida de estructura compuesta (falla de corte) en el Accidente en la L12 con base en el modo de falla identificado en la Fase 2. Se identificaron barreras preventivas entre esta amenaza (falla de corte) y el evento mayor (colapso del puente elevado). La revisión de las barreras entre el evento mayor y la consecuencia (es decir, barreras de mitigación) no se realizó como parte de este RCA Técnico. Las barreras forman la columna vertebral del Diagrama de Barreras del Incidente. Las barreras, una vez identificadas, fueron evaluadas para determinar cómo contribuyeron a la causa(s) de raíz del incidente. Una causa(s) de raíz se define como el factor(es) causal básico y subyacente en un accidente o en otro escenario de evento, que, si se hubiera eliminado, se habría evitado que ocurriera el accidente o el evento.[17] Con base en el análisis de barreras, se identificaron cuatro (4) barreras preventivas. A continuación, se presente un resumen de las barreras identificadas para el Accidente en la L12. Con base en la evaluación, cada barrera se identificó como Efectiva, Inefectiva, Faltante o Fallida; ver Tabla 14.

Tabla 14- Resumen de símbolos de estatus de las barreras y sus descripciones.

Estatus	Visualización de la Barrera en BSCAT™	Descripción
Efectiva		Barrera Gruesa
Inefectiva		Barrera Delgada
Faltante		Barrera Abierta
Fallida		Barrera Rota

A continuación, se muestran las descripciones de cada tipo de barrera:

- Barrera Efectiva: Una barrera que se desempeña de la forma en la que se propuso originalmente.

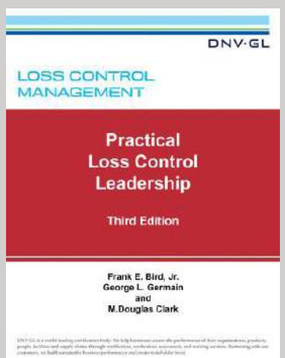
[17] Glosario de Ductos de PHMSA- http://primis.phmsa.dot.gov/comm/glossary/index.htm?nocache=5217#RootCause

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

La definición de causa raíz que se usa en este párrafo y a lo largo del documento no es consistente con la definición de "causa raíz" de la metodología de DNV. La definición que usaron, como se aclara en la nota al pie de página 17 de esta página, se retomó de una glosario de manejo de ductos (PHMSA), que dice: "causa raíz es el factor causal subyacente en un accidente u otro escenario de evento que si fuera removido habría prevenido la ocurrencia del accidente o evento".

Sin embargo la definición que proviene del libro de la metodología SCAT (técnica de análisis sistemático de causas) publicado por DNV dice: "Las causas básicas son las enfermedades o causas reales detrás de los síntomas; las razones por las que actos y condiciones subestándar ocurren; los factores que, cuando se identifican, permiten control sustantivo.

Frecuentemente a estas se les refiere como causas raíz, causas reales, causas indirectas, causas subyacentes o contribuyentes. Esto es porque las causas inmediatas (los síntomas, los actos o condiciones subestándar) usualmente son



- Barrera Inefectiva: Una barrera que existe y opera, pero cuyo desempeño es insatisfactorio. La barrera puede haber estado desempeñándose como se propuso originalmente; sin embargo, las condiciones pueden haber cambiado o ser tales que la barrera ya no es efectiva.
- Barrera Faltante: Una barrera que nunca existió o que existió alguna vez, pero fue eliminada o se volvió obsoleta.
- Barrera Fallida: Una barrera que existió originalmente pero que se degradó y ya no funciona como se propuso originalmente.

Se incluye una tabla al final de cada sección que resume el nombre de la barrera, el estatus de la barrera una explicación ampliada de la barrera, los potenciales contribuyentes para que una barrera fallara o se debilitara, líneas de investigación en las que se identificaron vacíos, y recomendaciones asociadas con las barreras identificadas. En el Anexo F se presenta una lista completa de lecciones aprendidas y recomendaciones. DNV usó el Sistema Internacional de Clasificación de Seguridad y Sustentabilidad (International Safety and Sustainability Rating System ™ (ISRS)) para identificar y resumir lecciones aprendidas y recomendaciones adicionales obtenidas a partir de la ejecución del **"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"** (es decir, Fases 1 a la 3). La Figura 32 muestra un diagrama BSCAT™ que despliega cada barrera, su explicación ampliada (texto en verde) y su estatus en el momento de la evaluación.

Cristina del Carmen
Perita Traductora
de Inglés autorizada por
el Tribunal Superior de
Justicia de Hidalgo
Registro:
SG-2020-435A
Flores García Luna

Sin comentarios

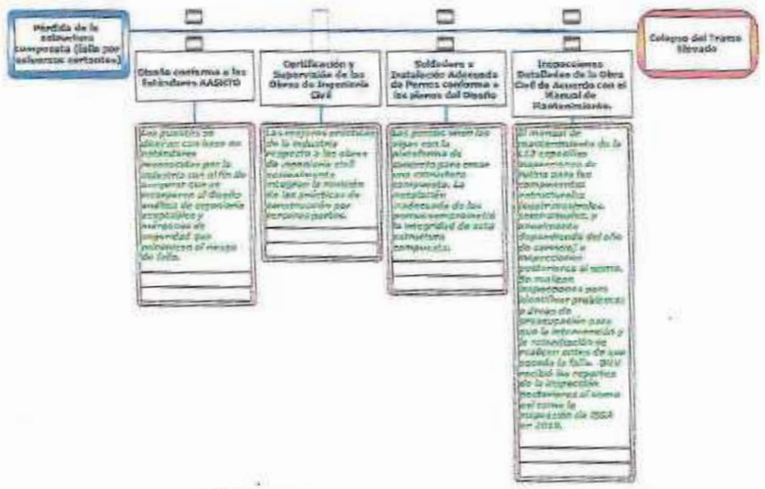


Figura 32- Diagrama de Incidentes BSCAT™ del Accidente en la L12 que muestra la explicación ampliada (texto en verde) y el estatus de la barrera en el momento de la evaluación (apariencia de la barrera).

5.2 Barreras Preventivas

5.2.1 Barrera 1: Diseño en cumplimiento con los Estándares AASHTO

Conforme a los documentos contractuales[18], el puente elevado se diseñó en cumplimiento con AASHTO LRFD 4ª Edición. Con base en la revisión y análisis de los documentos que se realizó como parte de esta investigación, los siguientes requerimientos de AASHTO no se cumplieron (consultar la Sección 3.3.2): 1) el diseño de la vida por fatiga (pernos), 2) la contra flecha por peso muerto requerido, 3) los elementos del marco transversal no se unieron directamente a los patines inferiores de las vigas, 4) los requerimientos de lecho para los elementos precolados 5) la falta de reforzamiento de corte en la interfase concreto precolado y concreto colado en el sitio.

Estas inconformidades fueron evaluadas para determinar si contribuyeron con un estado de tensión que habría reducido la capacidad de carga de la estructura compuesta, o si contribuyeron con las condiciones que habrían resultado en inestabilidades en el sistema. Los contribuyentes a la falla de la Barrera 1 se proporcionan en la siguiente tabla.

[18] PROPUESTA ECONÓMICA ICA - ALSTOM – CICSA_DOCUMENTO 4B _ANEXO 1.pdf

Cristina del Carmen Flores García Luna
Perito Traductor de Inglés autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo
Registro: SG-2020-035A

Sin comentarios

DNV

Barrera: Diseño en cumplimiento con los Estándares AASHTO	Estatus de la Barrera: Fallido

Explicación Ampliada: Los puentes se diseñan bajo estándares reconocidos de la industria para asegurar que se incorporen al diseño análisis de ingeniería y márgenes de seguridad aceptables que minimicen el riesgo de falla.

Contribuyentes potenciales a la Falla o Debilidad de una Barrera:

- La capacidad de fatiga de los pernos se excedió antes de la vida de diseño que se establece en los documentos de diseño y que se requiere en AASHTO LRFD 4a Edición. El análisis de fatiga de los pernos mostró que la vida estimada no excedía los 50 años y que se esperaba que el perno más crítico fallara después de 1.2 millones de trenes (equivalentes a aproximadamente 14 años de acuerdo a la suposición del diseño original). Una falla en el perno más crítico aceleraría la falla por fatiga de los pernos restantes. La falla por fatiga de los pernos reduce la capacidad de carga de la estructura compuesta y por lo tanto se determinó que era un factor contribuyente mayor del colapso del puente elevado.
- El detalle de la conexión del marco transversal con la viga no cumple con AASHTO LRFD 4a Edición. Esta desviación del estándar se sabe que lleva a la fatiga inducida por distorsión. La falla por fatiga del elemento transversal se ve como factor contribuyente para una mayor longitud sin refuerzo y, por lo tanto, al inicio de inestabilidades que pueden llevar a la deformación de las vigas.
- Los medios de soporte de los paneles de concreto precolado no se adhieren a AASHTO LRFD 4a Edición y se sabe que llevan a la delaminación del concreto colado en el sitio, causando, por lo tanto, una potencial reducción en la efectividad de la acción compuesta y a ser un posible contribuyente del colapso.

Otros factores no contribuyentes a la Falla o Debilidad de la Barrera:

- La contra flecha especificada es menor al valor mínimo requerido por AASHTO. Sin embargo, DNV no ve esta situación como una causa o contribuyente al colapso del puente elevado

Línea(s) de Investigación en las que se Identificaron Vacíos:

- Esta es una evaluación del diseño para la que DNV cuenta con todos los datos necesarios. Por lo tanto, no se identificaron vacíos.

Recomendaciones:

- Se debe asegurar que existan las revisiones de control de calidad apropiadas, que se ejecuten y se documenten formalmente, al igual que la verificación de cumplimiento con los estándares aplicables.

5.2.2 Barrera 2: Certificación y Supervisión de Obras de Ingeniería Civil

No se realizó la certificación de obras de ingeniería civil como es la mejor práctica de la industria. Debe observarse que no existen a nivel regional requerimientos regulatorios que establezcan específicamente que se requiere la certificación de terceros independientes para servicios como el Sistema Metro. Sin embargo, las certificaciones son lugar común para estas estructuras en cualquier otra parte del mundo. Un ejemplo de estas puede encontrarse en el despliegue del proyecto "Línea 2 y Ramal Av. Faucett – Av. Gambetta de la Red Básica del metro de Lima y Callao in Lima, Perú. Se refiere al Proyecto metro de tránsito en masa formado por 35 estaciones y dos (2) depósitos para la operación de trenes no atendidos, incluyendo: obra de ingeniería civil, sistemas de seguridad, sistemas electromecánicos y sistemas de rieles. Este Proyecto se corrió bajo una concesión entre el Metro de Lima Línea 2

SG-2020-435A

Sin comentarios

(concesionario) y el MTC (Ministro de Transportes y Comunicaciones) del Gobierno de Perú. Una certificación transversal de seguridad se encuentra en proceso que incluye a todos los subsistemas y la encabeza la compañía CERTIFER.

La supervisión de las obras de ingeniería civil de la L12 estuvo a cargo de las compañías LYTSA, IAC, EI, y DGPM; sin embargo, la documentación relacionada con la debida diligencia en ingeniería de dichas entidades de supervisión no fue proporcionada a DNV y/o no existe. DNV revisó los reportes de progreso semanal y fotografías del consorcio, así como bitácoras de campo de IAC para tener un entendimiento básico del proceso de construcción:

En estas bitácoras de campo se identificaron no conformidades con el número y ubicación de pernos colocados en comparación al diseño, en el intertramo Olivos – San Lorenzo Tezonco, sin embargo, no se observaron no conformidades entre las columnas 12 y 13. Las bitácoras indican que se abordaron estas no conformidades; sin embargo, los detalles sobre cómo se realizó y quienes no fueron proporcionados. No se observaron desviaciones adicionales en el diseño en otra información revisada, sin embargo, se observó en varias áreas de la documentación que se estaba realizando trabajo fuera de los diseños aprobados (los trabajos que se están realizando... no están indicados en su proyecto autorizado" que se traduce a "trabajo realizado sin proyecto"). Con base en las entrevistas realizadas a STC y CAF, una auditoría o revisión de ingeniería se encontraba fuera de las funciones y responsabilidades de las entidades contratadas y por lo tanto era responsabilidad del Consorcio. DNV solicitó los documentos a la SGIRTC (refiérase a la sección 2.2.3) relacionados con la auditoría interna y/o inspección del proyecto de la L12 que ejecutó el Consorcio; sin embargo, DNV no recibió ninguna documentación como respuesta a esta solicitud.

Barrera: Certificación y Supervisión de las Obras de Ingeniería Civil	Estatus de la Barrera: Faltante
Explicación Ampliada: Las mejores prácticas de la industria para obras de ingeniería civil normalmente integran la revisión de terceros sobre las prácticas de construcción.	
Contribuyentes potenciales a la Falla o Debilidad de una Barrera: • No hay requerimientos regionales para una certificación. • La estructura de las entidades contratantes falló al identificar los roles y responsabilidades de debida diligencia en ingeniería. • Se encontró manejo no consistente de la integración de los subsistemas de rieles (obras de ingeniería civil, sistemas de rieles, material rodante) y del manejo de interfases. Ésta también es una causa contribuyente para la deficiente interacción entre el riel y el material rodante al inicio de la operación, que también influyó en la necesidad de realizar una rehabilitación mayor en la L12. • Hasta la fecha no existe evidencia que sugiera que el Consorcio realizó auditorías y/o inspecciones internas.	
Línea(s) de Investigación en las que se Identificaron Vacíos: • DNV solicitó, pero nunca se le otorgó, acceso a entrevistar al personal asociado con la firma	

Cristina del Carmen Flores Ramírez
Perito Traductor de Inglés autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo
Registro: SG-2020-435A
104
Lima

Sin comentarios

DNV

de construcción y sus subcontratistas. No pudo ser evaluada la distribución de roles y responsabilidades de la compañía de construcción y sus subcontratistas. • Se aportó evidencia a DNV relativa a los trabajos de rehabilitación realizados para su revisión. Los trabajos de rehabilitación implicaron la utilización de maquinaria pesada en la interestación entre Olivos y Tezonco. Sin embargo, y dado que las cargas asociadas a esta maquinaria no pudieron ser determinadas, DNV no puede concluir sobre si dichas cargas fueron un factor causal contribuyente.
Recomendaciones: • Las mejores prácticas de la industria identifican el uso de entidades externas al grupo de construcción que son responsables del aseguramiento de calidad y la certificación de la construcción. Esto deberá considerarse obligatorio para futuros contratos.

5.2.3 Barrera 3: La Soldadura e Instalación Apropiada de Pernos Conforme a los planos del Diseño

La inspección en campo a los pernos realizada por personal de DNV identificó significativas deficiencias en su instalación. Hubo evidencia de que no se realizó la inspección visual posterior a los trabajos de soldadura (es decir, los ferrules de cerámica seguían presenten en casi todos los pernos, y debían haber sido retirados para poder inspeccionar la soldadura). Con base en fotografías del periodo de instalación, parece que los pernos se colocaron después de que se instalaran los paneles de concreto precolado, limitando aún más o haciendo imposible realizar las inspecciones en las estrechas cavidades presentes en los paneles precolados. A partir de esta evidencia, es claro que no se cumplieron los requerimientos que se especifican en AWS D1.1:2002 en sus Secciones 7.8.1 Inspección Visual y 7.4.6 Retiro del blindaje de arco, respectivamente. AWS D1.1:2002 fue el estándar aplicable al soldado de los pernos en el momento de la construcción.

DNV solicitó al Consorcio documentación relacionada con la construcción, así como entrevistas a STC y CAF que no fueron proporcionadas. La documentación específica solicitada se relacionaba con los procedimientos para el soldado de los pernos, procedimientos de inspección y partes responsables de las inspecciones visuales. Este material no fue identificado en respuesta a las solicitudes de DNV. Debe observarse que las obligaciones contractuales del Consorcio para conservar estos registros son de cinco (5) años según el contrato. Como el incidente cae fuera del tiempo requerido, no está claro si la documentación fue desechada o nunca la produjo el contratista. Consecuentemente, no hay documentación que dé soporte al hecho que el Contratista de soldado de los pernos cumplió con los requerimientos de AWS D1.1:2002 que se muestran a continuación:

- Calificación del equipo y materiales para el soldado de pernos antes de iniciar la producción y cada día de la producción (7.7.1)
- Calificación de los operadores que realizan el soldado de los pernos antes de iniciar la producción (7.7.4)
- Calificación de procedimientos de soldadura antes de iniciar la producción y antes de cada día de producción (7.7.1)

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

Sin comentarios

- Se debe asegurar que los pernos de la producción y el metal base estén limpios, sin corrosión, sarro, grasa, humedad u otros materiales nocivos que pudieran afectar adversamente la soldadura (7.4.1, 7.4.3)
- Realizar la inspección visual verificando que todas las soldaduras de los pernos tengan los destellos de soldadura alrededor de toda la circunferencia del perno, lo que requiere el retiro de los ferrules para poder observar los destellos de la soldadura (7.4.7, 7.8.1)

La calidad de soldado en los pernos era muy deficiente. Los resultados de la investigación de causas inmediatas (Fase 2) identificaron defectos en la soldadura que incluyeron fusión incompleta, porosidad, y no uniformidad en perfiles de soldadura (o la falta completa de éstos). Adicionalmente, los cuatro pernos que fueron probados no cumplieron con las métricas de desempeño asociadas con el desempeño mecánico detallado en AWS D1.1, específicamente el relacionado con pruebas de flexibilidad y pruebas de tensión. Las cargas de falla de las dos pruebas de tensión mostraron gran variación y se encontraron muy por debajo de la capacidad de tensión requerida para los pernos, encontrándose el menor en el 15.8% de la capacidad requerida.

Finalmente, se identificó que muchos de los pernos a lo largo de las Vigas Norte, Sur y T-6 estaban mal colocados o eran inexistentes. Conforme a los planos del diseño, las Vigas Norte y Sur debieron haber sido instaladas, cada una con filas de tres (3) pernos espaciados 30 cm a lo largo de toda la longitud de la viga. Para la longitud inspeccionable de las vigas (16.2 m debido a la presencia de concreto aún unido a la Sección Este), esto corresponde a un total de aproximadamente 159 pernos. Con base en la inspección visual realizada por DNV, sólo se identificaron 113 y 110 pernos remanentes en las Vigas Norte y Sur, respectivamente. Por lo tanto, aproximadamente 30% de los pernos o no estaban instalados o la instalación era tan deficiente que no había rastros obvios de soldadura residual. De manera similar, los detalles de la Viga T-6 especifican que los pernos debían instalarse en filas de dos (2) especiados a 30 cm a lo largo de toda la longitud de la viga. Los resultados del análisis de causas inmediatas identificaron que la mayor parte de la viga no tenía ningún perno. De hecho, sólo se identificaron 29 de los 86 pernos. Esto corresponde a que aproximadamente 71% de los pernos no fueron instalados o su instalación era tan deficiente que no había rastros de soldadura residual.

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

Sin comentarios

DNV

Barrera: La Soldadura e Instalación Apropiada de Pernos Conforme a los planos del Diseño	Estatus de la Barrera: Fallido

Explicación Ampliada: Los pernos proporcionan unión entre las vigas y la plataforma de concreto para crear una estructura compuesta. La instalación inadecuada de los pernos comprometió la integridad de esta estructura compuesta.

Contribuyentes potenciales a la Falla o Debilidad de una Barrera:

- No se cumplió con los requerimientos de AWS D1.1:2002, incluyendo:
  - Calificación del equipo y materiales de soldado por parte del contratista, antes de iniciar la producción y antes de cada día de producción (7.7.1)
  - Calificación por parte del Contratista de los operadores que realizan el soldado de los pernos antes de iniciar la producción (7.7.4)
  - Calificación de procedimientos de soldadura por parte del Contratista antes de iniciar la producción y antes de cada día de producción (7.7.1)
  - Se debe asegurar que los pernos de la producción y el metal base estén limpios, sin corrosión, sarro, grasa, humedad u otros materiales nocivos que pudieran afectar adversamente la soldadura (7.4.1, 7.4.3)
  - El contratista debe realizar la inspección visual verificando que todas las soldaduras de los pernos tengan los destellos de soldadura alrededor de toda la circunferencia del perno, lo que requiere el retiro de los ferrules para poder observar los destellos de la soldadura (7.4.7, 7.8.1)
  - Inspección visual y pruebas de flexibilidad de 15° a soldaduras de pernos seleccionados por el Inspector (7.8.2)
  - Responsabilidad del contratista para realizar el trabajo de conformidad con los requerimientos para el soldado de pernos (1.4.2)
  - Inspección del contratista para asegurar que los materiales y el acabado cumplen con los requerimientos para el soldado de pernos (6.1.2.1)
  - Inspección bajo la autoridad del propietario para asegurar que todas las inspecciones se realicen y que la calidad en el soldado de los pernos cumpla con los requerimientos (6.1.2.2, 6.1.3.2)
- No se cumplió con los planos de diseño, incluyendo la ubicación y cantidad de pernos que se instalaron.
- Los paneles de concreto precolado tienen huecos que se alinean con la ubicación de las vigas para permitir la instalación de los pernos. Los paneles utilizados en la L12 contenían dichos huecos; sin embargo, no estaban alineados con las vigas. Por lo tanto, se realizaron alteraciones en campo a dichos paneles (con martillo neumático) para tener acceso a las vigas y poder instalar los pernos.

Línea(s) de investigación en las que se Identificaron Vacíos:

- DNV solicitó, aunque no le fue otorgado, acceso para entrevistar al personal relacionado con el Consorcio y sus subcontratistas. No se pudieron evaluar los roles y responsabilidades del Consorcio y sus subcontratistas ni si se estaba cumpliendo con ellos.

Recomendaciones:

- Las mejores prácticas de la industria identifican la existencia de entidades externas al grupo de construcción responsables del aseguramiento de calidad en la instalación de los pernos. Esto debe ser obligatorio en futuros contratos.

Cristine del Carmen Flores Lima
Perito Traductor de Idioma autorizado por la Corte Superior de Justicia de Tarapoto
Registro: SG-2020-436A
107

Sin comentarios

DNV

5.2.4 Barrera 4: Inspecciones Detalladas de la Obra Civil de acuerdo con el manual de mantenimiento.

Previo al accidente, el historial de imágenes de Google Street View (2017-2020) y de una inspección realizada con drones en 2019 en el tramo afectado del puente elevado, muestra evidencia de deformación y pandeo de los atiesadores longitudinales de las vigas, deflexión vertical negativa de las vigas y deflexión del miembro transversal central. Además de las deflexiones observadas, la presencia de eflorescencia en el concreto fue consistente con la deflexión de la viga. Deben realizarse inspecciones anuales de estos componentes en cumplimiento con el manual de mantenimiento de la L12; sin embargo, no existe evidencia (documentación, datos, o de otro tipo) que haya sido proporcionada a DNV que indique que se realizaron inspecciones rutinarias. Se realizaron varias inspecciones posteriores al sismo, pero no destacaron las observaciones de estos aspectos. La evidencia de afectaciones a la estructura, incluido el pandeo en el atiesador longitudinal, la deflexión del marco transversal central y la eflorescencia, eran visibles en las imágenes de Google adquiridas a nivel de calle indicando que la afectación habría sido visible mediante una inspección visual que sea consistente con las prácticas típicas de la industria.

Las inspecciones y evaluaciones de mantenimiento fueron realizadas por ISSA en 2019, que incluyó evaluaciones de las columnas, los cimientos de las columnas y las condiciones del suelo; sin embargo, no incluyeron ningún análisis para identificar deformaciones o daños de los elementos estructurales de acero, incluidas las vigas o los marcos transversales. Durante estas evaluaciones no se observaron desplazamientos en las Columnas 12 y 13.[1485].

Se realizaron inspecciones cuando los eventos sísmicos excedieron una magnitud de 7.0; sin embargo, las inspecciones no identificaron la deflexión en el tramo medio y en los marcos transversales ya que bajo el efecto de cargas muertas había una contraflecha negativa de más de 3 pulgadas. Cabe mencionar que en ninguna de las evaluaciones realizadas se observó la evidente rotación del soporte de luz elevadizo que se une a T-8. Dicha rotación es un indicador de deflexiones indeseables dentro de los componentes estructurales.

Barrera: Inspecciones Detalladas de la Obra Civil de acuerdo con el manual de mantenimiento	Estatus de la Barrera: Fallido

Explicación Ampliada: El manual de mantenimiento de la L12 especifica inspecciones de rutina para los componentes estructurales (trimestrales, semi-anuales, y anualmente dependiendo del año de servicio) y posteriores a los sismos. Se realizan inspecciones para identificar problemas o áreas de preocupación para que la intervención y remediación se realicen antes de que suceda la falla. DNV no recibió documentación que indicara que dichas inspecciones de rutina fueran realizadas; sin embargo, DNV recibió los reportes de la inspección posteriores al sismo así como la inspección de ISSA en 2019.

Contribuyentes potenciales a la Falla o Debilidad de una Barrera:

- El manual de mantenimiento no especifica claramente quién es la parte(s) responsable en el STC de la inspección y mantenimiento.
- El manual de mantenimiento carece de detalles sobre el alcance de cada inspección

Cristina del Carmen Flores Luna
Perito Traductor de Inglés autorizado por el Tribunal Superior de Justicia de Hidalgo
Registro: SG-2020-435A
108

Aunque DNV señala que las inspecciones debieron de hacerse conforme el manual de mantenimiento, en la siguiente página en el mismo reporte señala que el manual de mantenimiento es deficiente, y por ejemplo no señala los alcances que deben tener las inspecciones; y es impreciso sobre cómo medir las deflexiones de elementos metálicos (páginas IX y 109).

Recomendaciones:

- Revisar el manual de mantenimiento para especificar lo siguiente: (1) aclarar el alcance de cada inspección, (2) detallar el trabajo a realizar, (3) identificar las credenciales necesarias de quienes llevan a cabo la inspección, (4) identificar los recursos que se utilizarán y (5) identificar a las partes responsables dentro del STC de ejecutar inspecciones y dar seguimiento a las inspecciones. Con base en los hallazgos del RCA técnico, se deben incluir estos detalles específicos:
  - Aclarar bajo qué escenarios se miden las deflexiones
  - Identificar cómo se debe medir la deflexión para casos de carga muerta y carga viva
  - Identificar un valor para una deflexión negativa inaceptable bajo carga muerta,
- Realizar inspecciones rutinarias requeridas en el manual de mantenimiento revisado y corregido.

Como señala el propio reporte sí se hicieron inspecciones a la Línea 12. **Una de ellas fue en el 2019**, que hizo la empresa ISSA; y **otra se hizo en junio del 2020.** En el año 2021 en abril se adjudicó el contrato para hacer **una nueva inspección** a partir de mayo.

MONITOREO E INSTRUMENTACION SISTEMATICA Y SEGUIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DEL TRAMO ELEVADO DE LA LÍNEA 12.

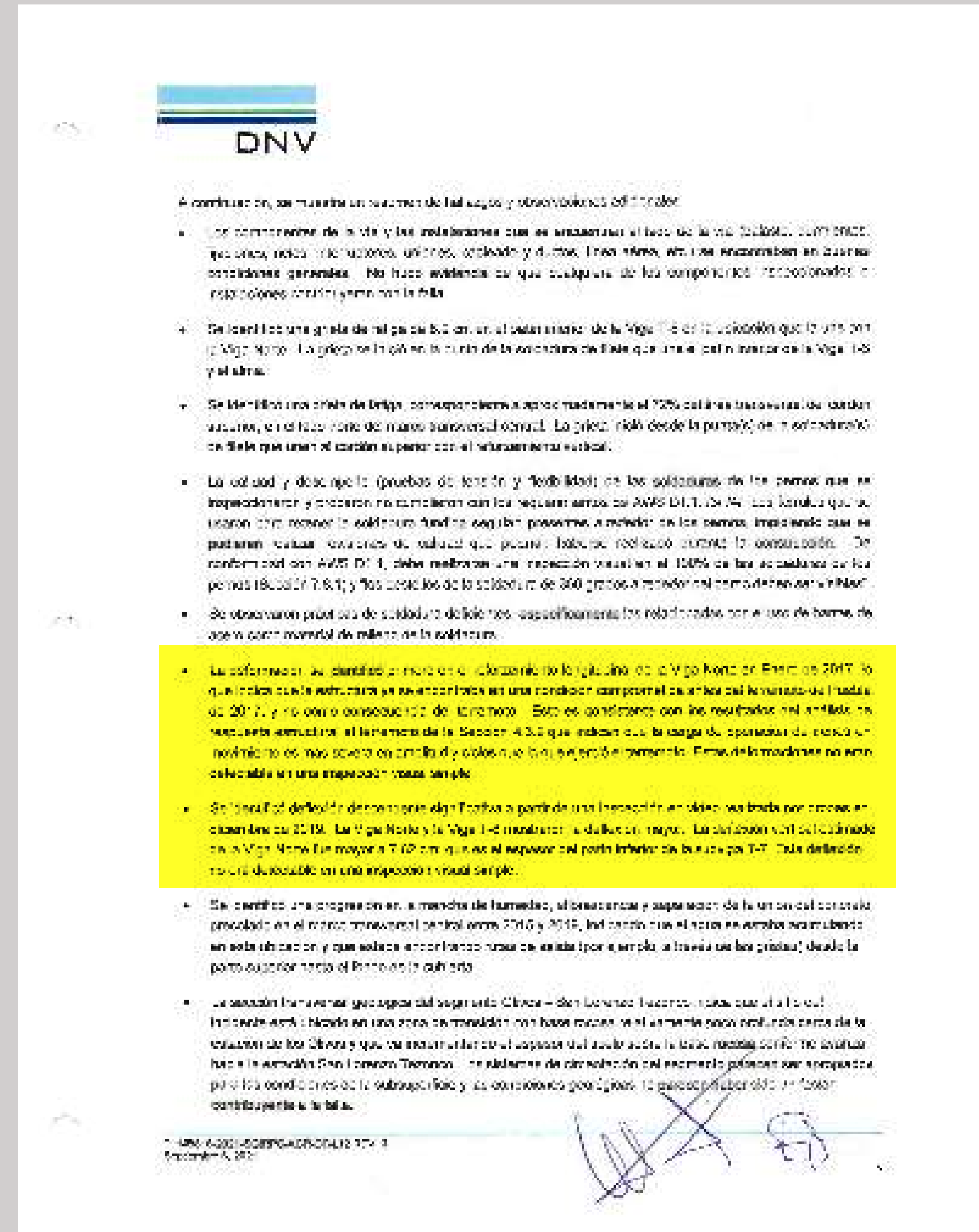
Contrato No. SDGM-GOM-LP-1-12/19

INFORME

No. CLAVE: 2019-ISSA-TOP-L12M-000-III-221-2214-0	FECHA: DICIEMBRE / 2019	HOJA 1 DE 10
TITULO: INFORME FINAL DE DESPLOMOS DE LAS COLUMNAS DEL VIADUCTO ELEVADO DE LINEA 12, INCLUYE ANALISIS Y DETERMINACION DE SU COMPORTAMIENTO.	ESTACIÓN / TRAMO: ZAPOTITLÁN - CUILHUACÁN	
ISSA Ingeniería, Servicios y Sistemas Avanzados S.A. de C.V.	SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO	

Página en blanco

Las causas presentadas por DNV como causas del colapso del tramo elevado (pérdida de la estructura compuesta por las fallas de diseño e instalación inadecuada de pernos) no hubieran sido identificables mediante una inspección visual, como las solicitadas por el manual de mantenimiento y ejecutadas entre el 2019 y 2020. En el Dictamen Final de Fase II, incluso se dice que la deflexión que DNV retoma de un video, no era detectable en una inspección visual simple. (Página V y 71, ver siguiente página).


DNV

trabajo a realizar, las credenciales necesarias de la persona que realiza la inspección o los recursos que se utilizarán

Línea(s) de Investigación en las que se Identificaron Vacíos:

- DNV solicitó, y no le fueron otorgados, documentos de las inspecciones rutinarias en componentes estructurales de la L12. No es claro si los documentos no existen o si no se realizaron las inspecciones.

Recomendaciones:

- Revisar el manual de mantenimiento para especificar lo siguiente: (1) aclarar el alcance de cada inspección, (2) detallar el trabajo a realizar, (3) identificar las credenciales necesarias de quienes llevan a cabo la inspección, (4) identificar los recursos que se utilizarán y (5) identificar a las partes responsables dentro del STC de ejecutar inspecciones y dar seguimiento a las inspecciones. Con base en los hallazgos del RCA técnico, se deben incluir estos detalles específicos:
    - Aclarar bajo qué escenarios se miden las deflexiones
    - Identificar cómo se debe medir la deflexión para casos de carga muerta y carga viva
    - Identificar un valor para una deflexión negativa inaceptable bajo carga muerta,
- Realizar inspecciones rutinarias requeridas en el manual de mantenimiento revisado y corregido.
- Si se realizaron las inspecciones, realizar una revisión profunda para determinar porqué se omitieron las áreas de deflexión y deformación. Lo anterior debe incluir una evaluación de las técnicas actuales de inspección, frecuencia y control de calidad conforme a las mejores prácticas de la industria.

6.0 RESUMEN

DNV identificó y evaluó cuatro (4) barreras preventivas (Sección 5.2) como amenaza a la pérdida de estructura compuesta (falla de corte) 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 identificados. Algunas debilidades comúnmente identificadas se relacionaron con la falta de supervisión efectiva en diversas etapas del proyecto. DNV concluye que mitigar la amenaza de pérdida de estructura compuesta (falla de corte) en el caso del Accidente de la L12 no se habría logrado direccionando sólo una de las barreras. Obsérvese que, como parte de la investigación, DNV identificó lecciones aprendidas y recomendaciones adicionales que no fueron causales del accidente pero que son áreas de mejora. Éstas se muestran en el Anexo F.

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

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

Cristina del Carmen Flores García Luna
Perito Traductor Autorizado por el Consejo Superior de Justicia de Hidalgo
Registro: SG-2020-435A

Sin comentarios

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 negativa 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 según los requerimientos del manual de mantenimiento revisado y corregido.
- 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.

CRISTINA DEL CARMEN FLORES GARCÍA LUNA, PERITO TRADUCTOR DE INGLÉS AUTORIZADO POR EL H. TRIBUNAL SUPERIOR DE JUSTICIA DEL ESTADO DE HIDALGO CON NÚMERO DE REGISTRO **SG-2020-435-A**, CERTIFICO Y HAGO CONSTAR QUE EL PRESENTE DOCUMENTO EN (110) FOJAS SELLADAS Y FIRMADAS, ES A MI LEAL SABER Y ENTENDER, UNA TRADUCCIÓN FIEL AL ESPAÑOL DEL DOCUMENTO ORIGINAL EN (103) FOJAS SELLADAS E INICIALIZADAS QUE FUE REDACTADO EN INGLÉS DEL DOCUMENTO "TECHNICAL ROOT CAUSE ANALYSIS OF THE METRO LINE 12 ACCIDENT – PHASE 3", CON EXCEPCIÓN DE LAS PRIMERAS TRES HOJAS QUE CONFORMAN LA CARATULA Y LA HOJA DE FIRMAS, QUE NO SE TRADUJERON PERO QUE SE INLCUYEN CON PROPOSITOS DE REFERENCIA. PARA LOS FINES DEL PERITAJE EL DOCUMENTO ORIGEN Y EL DOCUMENTO TRADUCIDO CONFORMAN UN SOLO TEXTO.

HIDALGO, MÉXICO. A 27 DE ENERO DE 2022

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

Sin comentarios