

Simulación y Evaluación del Impacto de Daños en la Integridad Estructural de Puentes de Acero: Estudio de Caso del Puente Ferroviario de Záběhlice

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

CONSTANCIA DE PRESENTACIÓN PÚBLICA DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Simulación y evaluación del impacto de daños en la integridad estructural de puentes de acero: Estudio de caso del puente ferroviario de Záběhllice en la República Checa


Llevado a cabo por el estudiante:

Vega Rodríguez Joseph Alexei

Carné: 2018199839

Trabajo Final de Graduación presentado públicamente ante el Tribunal Evaluador el lunes 02 de setiembre de 2024 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

 Firmado digitalmente por
JOSE ANDRES ARAYA
OBANDO (FIRMA)
Fecha: 2024.09.05
11:04:47 -06'00'

Dr. José Andrés Araya Obando
Director de la Escuela

GUSTAVO
ADOLFO ROJAS
MOYA (FIRMA) Firmado digitalmente
por GUSTAVO ADOLFO
ROJAS MOYA (FIRMA)
Fecha: 2024.09.04
12:36:50 -06'00'

Ing. Gustavo Rojas Moya, MSc.
Profesor Guía

GIANNINA
ORTIZ QUESADA
(FIRMA) Firmado digitalmente
por GIANNINA ORTIZ
QUESADA (FIRMA)
Fecha: 2024.09.05
08:11:05 -06'00'

Ing. Giannina Ortiz Quesada, MSc.
Profesora Lectora

MILTON ANTONIO
SANDOVAL QUIROS
(FIRMA) Firmado digitalmente por MILTON
ANTONIO SANDOVAL QUIROS (FIRMA)
Fecha: 2024.09.02 09:47:38 -06'00'

Ing. Milton Sandoval Quirós, MAE
Profesor Observador

Resumen

La siguiente tesis aborda la necesidad de comprender el impacto de defectos y daños acumulados sobre el comportamiento estructural de puentes de acero. Con el fin de esclarecer la conexión entre las anomalías detectadas y la capacidad portante de dichas estructuras, se realiza el estudio de un puente ferroviario de tipo viga, generando conclusiones que aportan a la gestión de infraestructuras viales.

Mediante el uso de software de modelado y análisis estructural, pruebas de deflexión y caracterización de los materiales, se crea un modelo de una estructura ubicada en la región de Záběhlce, República Checa, con el objetivo de discernir cómo las variaciones en su integridad estructural inciden en su desempeño global.

Este proyecto tiene como objetivo comparar el comportamiento de un puente de acero bajo distintos tipos de falla en diversas condiciones de carga, evaluando el impacto de daños típicos en la integridad estructural. A través del análisis de datos de inspecciones, pruebas de carga y simulaciones estructurales, se busca identificar discrepancias y formular estrategias para mejorar la gestión y extender la durabilidad de estas estructuras.

Finalmente, se obtienen un modelo predictivo para simular el comportamiento del puente, así como un informe del estado actual del puente.

Palabras clave: puentes de acero, modelos estructurales, técnicas de detección.

Abstract

The following thesis addresses the need to understand the impact of accumulated defects and damage on the structural behavior of steel bridges, aiming to clarify the connection between detected anomalies and the load-bearing capacity of such structures. To this end, a study of a beam-type railway bridge is conducted, yielding conclusions that contribute to the management of road infrastructures.

Through the use of structural modeling and analysis software, deflection tests, and material characterization, a model of a structure located in the Záběhllice region, Czech Republic, is created to discern how variations in its structural integrity affect its overall performance.

This project aims to compare the behavior of a steel bridge under different types of failure in various load conditions, evaluating the impact of typical damage on structural integrity. Through the analysis of data from inspections, load tests, and structural simulations, the goal is to identify discrepancies and formulate strategies to improve management and extend the durability of these structures.

Ultimately, a predictive model for simulating the bridge's behavior is developed, along with a report on the current state of the bridge.

Keywords: Steel bridges, structural modeling, detection techniques.

Simulación y Evaluación del Impacto de Daños en la Integridad Estructural de Puentes de Acero: Estudio de Caso del Puente Ferroviario de Záběhlice

JOSEPH VEGA RODRÍGUEZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción.

Julio de 2024

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Índice de contenido

Resumen ejecutivo	6
Introducción	8
Estudio de caso: Puente en Záběhlice	12
Capítulo 1: Marco teórico	18
1.1 Generalidades de los puentes	18
1.2 Comportamiento estructural	23
1.3 Modelos estructurales	37
1.4 Daños típicos en estructuras de acero	41
1.5 Pruebas	44
Capítulo 2: Metodología	54
2.1 Revisión de material previo	54
2.2 Creación del modelo estructural	56
2.3 Simulación de daños	63
Capítulo 3: Resultados	69
3.1 Informe característico de daños	69
3.2 Validación del modelo	76
3.3 Daños simulados	86
Capítulo 4: Análisis de resultados	172
4.1 Validación	172
4.2 Simulaciones	173
Conclusiones y recomendaciones	186
Referencias	192
Anexos	196

Resumen ejecutivo

En este estudio se muestra un análisis del impacto que defectos y daños acumulados tienen en la integridad estructural de puentes de acero, centrándose en el caso específico de un puente ferroviario en la región de Záběhlice, en República Checa. A través de un enfoque metodológico que incluye modelos estructurales, pruebas de deflexión y caracterización de materiales, esta investigación busca no solo identificar, sino también cuantificar el efecto de las anomalías en la capacidad portante de estas estructuras.

La investigación tiene como objetivo principal comparar el comportamiento del puente bajo distintas condiciones de carga y diferentes escenarios de falla, con el fin de comprender cómo las anomalías estructurales afectan su capacidad portante y su respuesta ante solicitaciones. Este conocimiento es fundamental para optimizar las estrategias de mantenimiento y reparación, así como para desarrollar modelos predictivos que permitan anticipar el comportamiento futuro de puentes similares.

Para lograr este objetivo, se emplea una metodología que combina el análisis de datos de inspecciones, la realización de pruebas de carga in situ y la creación de modelos estructurales utilizando software especializado. Estos modelos permiten simular el comportamiento del puente bajo diferentes condiciones y evaluar el impacto de los daños en su respuesta estructural.

El puente como tal, enfrenta varios desafíos estructurales que pueden comprometer su funcionalidad y seguridad a largo plazo. Construido principalmente de acero, la estructura ha sido objeto de numerosas inspecciones y pruebas que han revelado una serie de deficiencias que requieren atención.

Actualmente, la estructura muestra signos evidentes de desgaste y deterioro. La corrosión ha afectado varias áreas del puente, especialmente en las uniones críticas y en las zonas expuestas a la infiltración de agua. Aunque la mayoría de las vigas principales y transversales conservan su integridad estructural, la corrosión superficial y el desprendimiento del revestimiento son prevalentes; en algunos puntos, la corrosión ha penetrado más profundamente, comprometiendo la resistencia del material. Además, se observan daños por corrosión pítica y pérdidas locales de material en áreas específicas.

A partir de la información disponible se dispone a realizar modelos estructurales utilizando el software CSI Bridge y a validar los datos con los hallados en pruebas realizadas a la estructura. Los resultados de este estudio revelan la importancia de considerar los efectos combinados de múltiples tipos de daño en la evaluación de la integridad estructural de puentes de acero.

Las distintas simulaciones de daños revelaron que existen zonas críticas que pueden requerir atención bajo diversos escenarios de daños. En estas simulaciones, se evidenciaron incrementos significativos de los esfuerzos en ciertas áreas del puente. Por ejemplo, se observó que en escenarios donde la corrosión había avanzado considerablemente, los esfuerzos en las vigas principales se incrementaron en un 30%, lo que podría llevar a fallas estructurales si no se interviene adecuadamente. Además se resalta la importancia de monitorear los apoyos pues se demostró que deterioros en estos resultan en esfuerzos críticos en la estructura.

El estudio sugiere que las estrategias de mantenimiento deben centrarse en la monitorización continua y la evaluación periódica de los apoyos y elementos estructurales críticos. Además, se recomienda el uso de modelos predictivos para anticipar el comportamiento futuro de la estructura y planificar intervenciones de mantenimiento oportunas. Es vital considerar tanto las cargas permanentes como las variables en la evaluación de la integridad estructural de puentes de acero para garantizar su durabilidad y seguridad a largo plazo.

Este proyecto contribuye al ODS 9, que promueve la construcción de infraestructuras resilientes, la industrialización inclusiva y sostenible, y el fomento de la innovación. También apoya el ODS 11, orientado a lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, al mejorar la seguridad y la eficiencia de los puentes de acero, contribuyendo a la seguridad vial y a la reducción de accidentes.

El análisis realizado proporciona una base para futuras investigaciones y el desarrollo de estrategias de gestión de infraestructuras viales, asegurando la funcionalidad y seguridad de puentes ferroviarios de acero bajo diversas condiciones operativas.

Introducción

Los puentes, elementos vitales en nuestra infraestructura, facilitan no solo el tránsito y la conectividad sino también impulsan el desarrollo económico. No obstante, están sujetos a condiciones desgastantes relacionadas con factores ambientales, envejecimiento de materiales y ciclos de carga, lo que subraya la importancia de un mantenimiento eficaz y un sistema completo de detección y evaluación de fallas. Este enfoque no solo es esencial para preservar su funcionalidad, sino que representa una inversión valiosa en la seguridad y el bienestar social (Farrar & Worden, 2010).

Aunque los avances en el Monitoreo de Salud Estructural (SHM) han mejorado la evaluación de estas estructuras, aún existe cierta brecha en la aplicación de modelos para el análisis detallado de defectos y fallas. Este estudio busca aportar, explorando cómo las afectaciones en la integridad estructural de los puentes influyen en su rendimiento, contribuyendo así a la seguridad y gestión de infraestructuras viales.

El problema central radica en la falta de un enfoque sistemático para evaluar y gestionar estos daños, agravada por la escasez de datos detallados y modelos específicos para estos tipos de puentes (Worden et al., 2007). Esta carencia puede desencadenar riesgos significativos para la seguridad pública y resultar en costosos gastos de mantenimiento y reparación.

La justificación de este proyecto se fundamenta en la creciente necesidad de comprender y abordar el impacto de defectos y daños acumulados periódicamente en puentes de acero. En la actualidad, la seguridad y la gestión eficiente de la infraestructura vial son imperativos fundamentales, y los puentes de acero desempeñan un rol esencial en este contexto.

Este estudio se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por las Naciones Unidas. En particular, se enfoca en el ODS 9, que promueve la construcción de infraestructuras resilientes, la promoción de la industrialización inclusiva y sostenible, y el fomento de la innovación. La mejora continua en la evaluación y gestión de la integridad estructural de los puentes apoya directamente la resiliencia de las infraestructuras críticas ante desafíos naturales y antropogénicos, contribuyendo así al desarrollo sostenible de las comunidades.

Adicionalmente, la investigación aborda indirectamente el ODS 11, que busca lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. Al mejorar la seguridad y la eficiencia de los puentes de acero, se contribuye a la seguridad vial y a la reducción de los accidentes, aspectos fundamentales para el desarrollo urbano sostenible.

La evaluación de puentes y estructuras mediante el uso de modelos computacionales ha sido un tema ampliamente investigado en la ingeniería estructural. Varios proyectos de investigación similares proporcionan valiosos conocimientos en este campo. A continuación, se destacan algunos ejemplos relevantes.

En 2023, Leonard, S & Solnosky, R, realizaron un estudio de modelado paramétrico integral que se centró en estructuras de madera. Su investigación se enfocó principalmente en la etapa de diseño temprano, con el propósito de facilitar decisiones informadas para cumplir con objetivos de sostenibilidad. Aunque su estudio se centró en estructuras de madera, destaca la importancia de modelos computacionales para evaluar el estado y las propiedades de elementos estructurales, lo cual es fundamental en la ingeniería de puentes.

En un contexto relacionado, Macho & Ryjaček, (2015) enfatizaron la necesidad crucial de comprender el impacto de la degradación en el comportamiento de las estructuras de acero. Su estudio se adentró en el análisis de elementos corroídos de un puente ferroviario. Este trabajo subraya la importancia crítica de entender cómo problemas de deterioro como la corrosión pueden poner en peligro la seguridad y la capacidad de carga de los puentes de acero.

Los modelos estructurales son herramientas fundamentales en la ingeniería y la ciencia de la construcción para comprender el comportamiento de estructuras. Esto se evidencia en el artículo de Seo & Linzell, (2013) donde mediante un modelo computacional estudiaron la respuesta sísmica de puentes de acero con curvaturas horizontales, particularmente en este caso, el enfoque en el modelado les permitió crear una representación precisa de la estructura del puente, aspecto primordial en una evaluación.

De manera similar, el estudio de Pan et al., (2009), se enfoca en la evaluación de la respuesta sísmica de puentes de vigas de acero de varios tramos simplemente apoyados utilizando modelos paramétricos. El artículo hace hincapié en la profundidad del análisis paramétrico donde se evaluó cómo varía la respuesta sísmica del puente en función de diferentes parámetros estructurales, proporcionando información valiosa sobre la sensibilidad del puente a las variaciones en la resistencia del acero de refuerzo, peso de la estructura, tamaño de juntas, entre otros factores.

En 2010, Ni et al., abordaron en su estudio un tema crítico en la ingeniería de puentes: la evaluación de la fatiga y confiabilidad de puentes de acero. En este, se utilizaron datos de monitoreo a largo plazo e incorporándolos en un modelo con una formulación probabilística basada en la regla de daño acumulativo de Miner. Los métodos y modelos propuestos en este estudio pueden proporcionar valiosos enfoques para evaluar cómo los daños pueden afectar la fatiga y la confiabilidad estructural en puentes de acero.

Estos estudios ejemplifican el valor del modelado estructural y los enfoques computacionales en el análisis y diseño estructural. Además, sirven como base para la investigación actual, que amplía estos principios para evaluar los efectos de distintos daños y percances en el comportamiento estructural de puentes de acero.

Objetivo general

Este proyecto tiene como objetivo principal comparar el comportamiento estructural de un puente de acero bajo diferentes escenarios de daño y condiciones de carga, con el fin de evaluar el impacto de daños típicos en su integridad y funcionalidad.

Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo estructural del puente en estudio para la simulación de su comportamiento teórico bajo distintas condiciones de carga.
- Caracterizar los tipos de daños presentes en la estructura mediante el análisis de datos de campo recopilados para la creación de un informe con el perfil del estado estructural actual.
- Simular daños típicos en los elementos de la estructura mediante el modelo para el análisis de su impacto en la integridad estructural.

La fundamentación teórica y los análisis matemáticos de este estudio se apoyan en una revisión de literatura especializada. Para la simulación de los modelos estructurales, se empleó el software CSI Bridge v25, apuntando a así tener cierta precisión y eficacia en los cálculos y resultados obtenidos.

Alcance y limitaciones

Este proyecto se centra en analizar el comportamiento estructural únicamente de un puente ubicado en la región de Záběhlce. Es importante mencionar que este corresponde a un puente ferroviario de tipo viga por lo que algunas conclusiones podrían verse referidas únicamente a estructuras con características similares, aunque los resultados proporcionan conocimientos sobre el comportamiento estructural de los puentes de viga, su aplicabilidad directa a estructuras de diferentes características o materiales puede requerir adaptaciones o análisis adicionales.

Es importante destacar dentro de las limitaciones de este proyecto que el enfoque principal se ha centrado en la evaluación estructural, con un interés específico en identificar y cuantificar posibles daños o deficiencias en su integridad. En consecuencia, este estudio no pretende adentrarse en aspectos relacionados con el diseño de puentes, tales como la selección de materiales, filosofías de diseño o consideraciones estéticas. Si bien se reconoce la importancia crítica de estos factores en la ingeniería de puentes, la delimitación del alcance del presente trabajo busca proporcionar un análisis focalizado en la evaluación estructural, dejando la exploración de los aspectos de diseño para investigaciones futuras.

Es relevante destacar que los datos analizados provienen de pruebas de carga e informes de diagnóstico realizados por la Facultad de Ingeniería Civil, más concretamente el Departamento de Estructuras de Acero y Madera, de la Universidad Técnica Checa. Por lo que se recalca que el autor no participó en la toma de datos ni procedimientos de prueba.

El alcance de esta tesis se centra también en la utilización de modelos estructurales generados a través del software CSI Bridge, los cuales han sido validados con resultados de pruebas experimentales. Enfocándose en una metodología comparativa con trabajos anteriores.

Uno de los propósitos de este documento es aportar al campo del mantenimiento y gestión de infraestructuras mediante el desarrollo de un modelo predictivo que permita evaluar el impacto de daños típicos en el comportamiento estructural de puentes de acero. Los resultados de esta investigación pueden ser utilizados para identificar áreas críticas, priorizar intervenciones de mantenimiento y optimizar la asignación de recursos, contribuyendo así a la seguridad y durabilidad de estas estructuras.

Estudio de caso: Puente en Záběhlice

El puente de estudio está situado en Záběhlice, una región que se extiende entre los distritos Praga 10 y 4 de la capital checa, específicamente en las coordenadas: 50°03'20.400"N, 14°28'44.300"E.

Figura 1. Ubicación geográfica del puente.



Fuente: Google Earth, 2024

La estructura forma parte del segmento ferroviario TU 206, específicamente en el kilómetro 2,512, (ver figura 1). Se caracteriza por tener un carril con rieles del tipo S49 asentados sobre balasto. La superestructura del puente se compone por vigas de acero mientras que la subestructura se sostiene sobre pilares de concreto reforzado.

El puente tiene una longitud total de 120.85 m dividida en tres vanos de 33, 39 y 33 m. La altura mínima desde la base hasta una carretera local bajo el primer vano es de 5.47 metros, teniendo la estructura una altura de 3.67 m. La vía está diseñada para velocidades de 80 km/h y se despliega inicialmente en una curva de 349.75 m de radio que se transforma en una recta en la mitad del segundo vano. En la figura 2 se muestra una vista longitudinal del tramo 2.

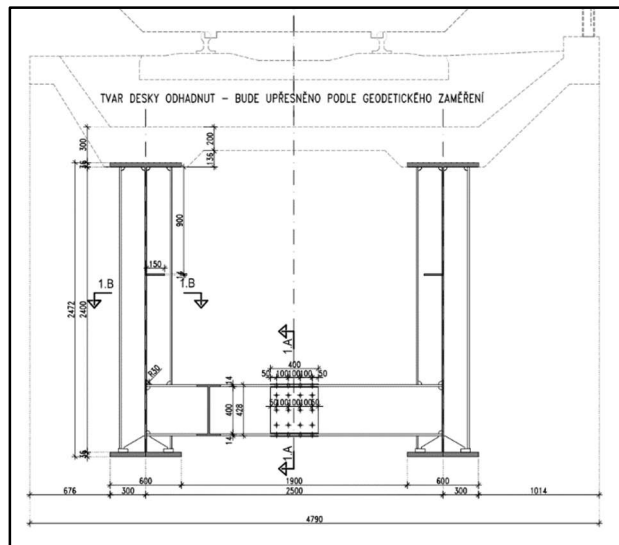
Figura 2. Vista longitudinal del puente.



Fuente: CVUT, 2017

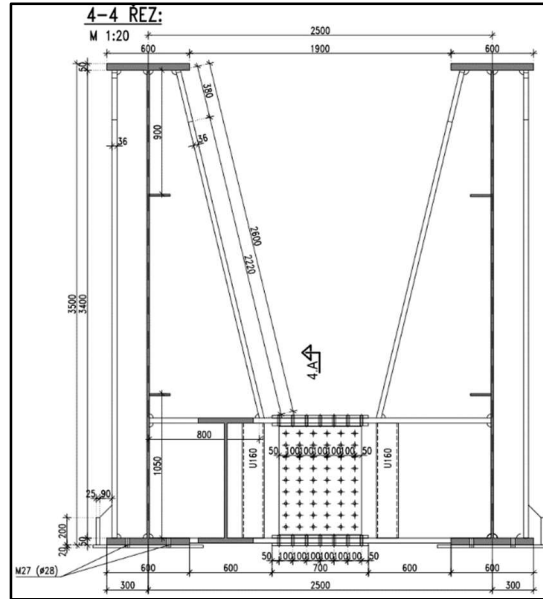
Construido en 1962, el puente fue sometido a importantes reparaciones en 1984 tras detectarse fisuras por fatiga. Las vigas de acero, de paredes y sección transversal variable, presentan una altura de muro de viga de 2.4 metros en los extremos y zonas intermedias, y de 3.4 metros sobre soportes internos (ver figuras 3 y 4). Estas vigas están internamente reforzadas con componentes horizontales, longitudinales y verticales.

Figura 3. Sección transversal del puente en apoyos externos.



Fuente: CVUT, 2017

Figura 4. Sección transversal del puente en apoyos internos.



Fuente: CVUT, 2017

La armadura consta de vigas I soldadas perpendicularmente a la viga principal, con vigas transversales sobre los soportes. Una losa de concreto reforzado de 200 mm de espesor descansa sobre estas estructuras, proporcionando refuerzo transversal y soportando la plataforma de vía que se extiende lateralmente para formar pasillos.

En cuanto a materiales, se especifica concreto C16/20, denominación que alude a su resistencia característica a la compresión en megapascales. El acero S235, utilizado en las vigas y otros elementos estructurales, ofrece una resistencia a la compresión y un límite elástico de 235 MPa. Para el refuerzo de la losa se emplea acero B400a, con una resistencia a la tracción de 400 MPa, destacando su alta ductilidad

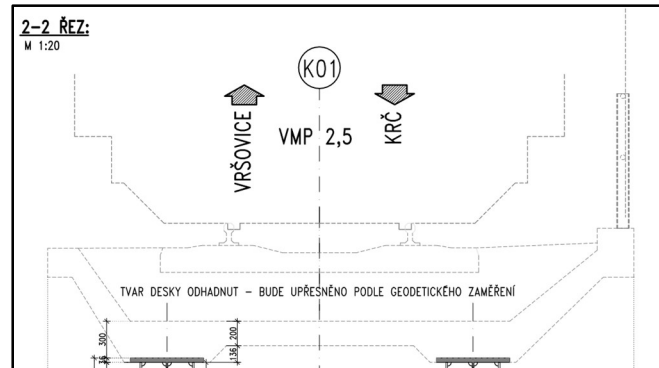
Figura 5. Esquema del puente

Poř.č.							Dopr.č.	
1	O01	K01	P01	K01	P02	K01	O02	1
	O01	K02	P01	K02	P02	K02	O02	
otvor	1		2		3			

Fuente: CVUT, 2017.

El esquema de la figura 5 detalla los tramos (o vanos) y los soportes del puente. El carril K01 se configura con vigas de acero de pared completa, soldadas y atornilladas, unidas a la losa de concreto reforzado con un lecho de vía a una altura aproximada de 0.50 m (ver figura 6).

Figura 6. Detalle del tablero del puente



Fuente: CVUT, 2017.

La estructura principal de los carriles K01 y K02 consiste en dos vigas de sección I separadas a 2.50 m que presentan variaciones en su configuración a lo largo de su longitud. Los tramos en los extremos, conocidos como tramos 1 y 3, cuentan con un alma de 2400 mm de altura y alas de 600 mm cuyo grosor varía entre 36 y 50 mm. En el tramo central, llamado tramo 2, el alma mantiene la misma altura de 2400 mm, pero el grosor de las alas se ajusta a un rango de 36 a 45 mm, y el grosor del alma en estas partes es de 14 mm. Sobre los pilares, la viga experimenta un cambio significativo: el alma aumenta su altura a 3400 mm y el grosor se incrementa a 18 mm.

Para fortalecer la viga principal, se ha integrado un refuerzo longitudinal de 150 mm de ancho que recorre dos tercios de la altura del interior de la viga. Además, en zonas que soportan cargas de flexión negativa, se ha agregado más refuerzo longitudinal.

En cuanto a las vigas transversales del puente, existen tres tipos distintos según su ubicación: sobre los soportes (O01 y O02) son perfiles I soldados de 625 mm de altura, mientras que en los tramos intermedios estos perfiles miden 428 mm de altura y sobre los pilares se utilizan perfiles de 906 mm de altura. Los travesaños sobre los soportes funcionan como parte de un semimarco que ayuda a transmitir las cargas a los apoyos

Los apoyos en O01 consisten en dos soportes fijos, mientras que en P01, P02 y O02 se utilizan soportes móviles para contrarrestar las dilataciones térmicas y otros movimientos estructurales.

El carril K02, de características similares al K01, se encuentra fuera de servicio. En cuanto a la subestructura, el soporte O01 presenta una pared final y un umbral concreto reforzado, con columnas de dimensiones 8.70 m x 4.50 m. Los pilares P01 y P02 comparten esta configuración, pero en forma de dos columnas cuadradas de 1.45 m de lado cada una. El soporte O02 sigue el mismo diseño, adaptándose a las necesidades estructurales específicas de ese punto del puente

Agradecimientos

A mi padre, Alexander Vega por su inquebrantable fe en mí y ser un modelo ejemplar de trabajo duro y esfuerzo.

A mi madre, Andrea Rodríguez, por apoyarme y amarme incondicionalmente.

A mis reales amigos, porque verlos superarse me motiva y por no permitirme perder de vista de lo que soy capaz.

Al Dr. Pavel Ryjáček y al personal de la Universidad Técnica Checa en Praga por su invaluable apoyo, haberme acogido en su comunidad académica y guiarme a través del riguroso camino de este trabajo.

Capítulo 1: Marco teórico

En este capítulo se establece el marco teórico para la comprensión del comportamiento estructural de puentes de acero, particularmente bajo diversas condiciones de carga y escenarios de daño. Se ofrece una visión que abarca desde las generalidades de los puentes, incluyendo sus tipologías y elementos estructurales, hasta una descripción pormenorizada del comportamiento estructural frente a diferentes tipos de cargas. Asimismo, se investigan los modelos estructurales aplicables y se analizan los daños típicos que afectan a las estructuras de acero, tales como la fatiga y la corrosión. Este marco proporciona una base para el desarrollo del modelo estructural y la simulación de escenarios de daño.

1.1 Generalidades de los puentes

Se puede definir un puente como una estructura construida para evitar obstáculos geográficos que significan la discontinuidad de una vía. Más allá de su función primordial de conectar dos puntos separados por un espacio físico, los puentes son manifestaciones de avances en ingeniería y diseño, reflejando la capacidad humana para innovar y superar limitaciones naturales (Reis & Pedro, 2019a).

Los puentes varían ampliamente en términos de diseño, materiales y tecnología de construcción, cada uno adaptado a las necesidades específicas del entorno y los requisitos de carga (Chatterjee, 2008). En su esencia, los puentes no solo son componentes cruciales de la infraestructura de transporte, mejorando la eficiencia y seguridad del tránsito, sino también obras de arte arquitectónico que pueden definir el carácter de paisajes urbanos y rurales.

1.1.1 Tipos de puentes

Los puentes pueden categorizarse bajo varios criterios, reflejando su diversidad en diseño y función. Según su propósito, varían ampliamente; desde aquellos destinados a soportar el tránsito vehicular y ferroviario, hasta los diseñados específicamente para canales de agua o como estructuras de apoyo en puertos, conocidos como puentes de muelle. (Reis & Pedro, 2019a).

En cuanto a los materiales de construcción, la gama incluye opciones como la madera, el acero, y el concreto, este último disponible en formas reforzadas o parcialmente preesforzadas, además de estructuras híbridas que combinan acero y concreto. La clasificación también se extiende al sistema estructural empleado, distinguiendo a los puentes por su arquitectura y método de soporte

Según su sistema estructural, Chatterjee (2008) identifica cinco tipos de puentes.

1.1.1.1 Puentes tipo viga

Se caracterizan por la flexión o curvatura entre apoyos verticales como su principal acción estructural. Estos pueden clasificarse, según su configuración, en vanos simples, vanos continuos y vanos suspendidos y en voladizo.

1.1.1.2 Puentes de marco rígido o reticulados

Los puentes de marco rígido presentan vigas longitudinales estructuralmente unidas a los soportes verticales o inclinados mediante uniones capaces de transmitir momentos; en este tipo, la acción estructural principal es la flexión acompañada de alguna fuerza axial.

1.1.1.3 Puentes de arco

Estos transfieren las cargas a las cimentaciones mediante elementos arqueados como componente estructural principal; la compresión axial en el nervio del arco, combinada con cierta flexión, es la acción estructural predominante. El empuje horizontal en los extremos se contrarresta ya sea por las cimentaciones o por un tirante que se extiende longitudinalmente a lo largo de toda la luz; este último se denomina arco atirantado o arco de tirante.

1.1.1.4 Puentes atirantados

Los puentes atirantados se distinguen porque las principales vigas longitudinales se sostienen mediante varios tirantes en el plano vertical o casi vertical, que cuelgan de una o más torres altas y suelen anclarse en la parte inferior a las vigas.

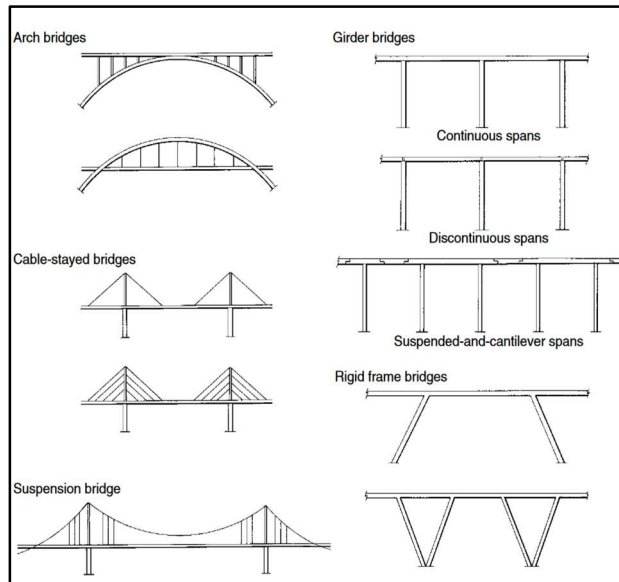
1.1.1.5 Puentes colgantes

Se caracterizan porque el tablero del puente está suspendido de cables que se extienden sobre el espacio a salvar, anclados al suelo en ambos extremos y pasando sobre torres altas erigidas en o cerca de los dos bordes

del espacio a cubrir. Los tres primeros tipos y la estructura del tablero de los dos últimos tipos de puentes pueden ser vigas o de armaduras.

La figura 7 ilustra los diversos tipos de puentes según su estructura.

Figura 7. *Distintos tipos de puentes.*



Fuente: Chatterjee, 2008.

1.1.2 Elementos estructurales

Muñoz y Gómez (2013) describen que, en términos generales, las secciones constituyentes de un puente incluyen:

1.1.2.1 Superestructura

Es el conjunto de componentes que se encuentran por encima de los apoyos o cimientos y sirve para soportar y distribuir las cargas de tráfico hacia los elementos de soporte. La superestructura incluye el tablero, vigas longitudinales y transversales, losas, rigidizadores y sistemas de suspensión (dependiendo el diseño específico del puente).

El tablero es la superficie por donde pasan los vehículos o peatones, y puede estar hecho de diversos materiales como hormigón, acero, madera, o una combinación de estos. Las vigas y losas trabajan conjuntamente para transmitir las cargas hacia las pilas y los estribos, que son parte de la subestructura del puente.

1.1.2.2 Subestructura

Son los componentes que soportan la superestructura y la conectan con el terreno. Estos son fundamentales para la estabilidad y seguridad del puente, ya que distribuyen las cargas de la superestructura hacia los cimientos. La componen pilares, estribos y cimientos.

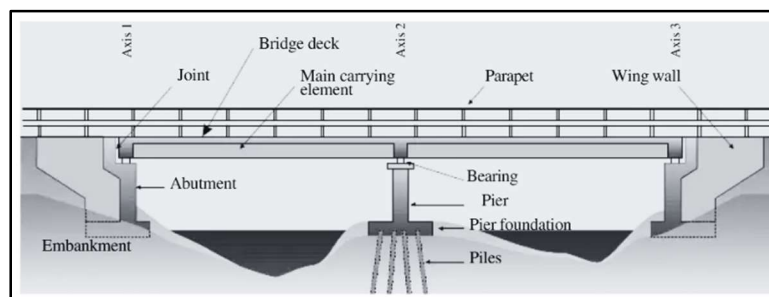
Los pilares son elementos verticales que proporcionan soporte intermedio a la superestructura en puntos a lo largo de su longitud. Se unen a la superestructura a partir de mecanismos de apoyo.

Los estribos se localizan en los extremos del puente, soportan los extremos de la superestructura y sirven como muro de contención.

Los cimientos son la base sobre la cual descansan pilares y estribos, distribuyen las cargas al suelo o roca subyacente.

La figura 8 ilustra los principales elementos estructurales que componen un puente.

Figura 8. Elementos estructurales de un puente.



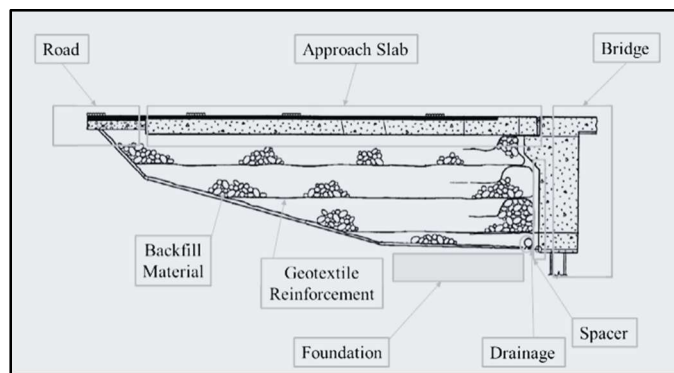
Fuente: Woodward et al., 2001

1.1.2.3 Losa de aproximación

Corresponde a la sección del puente que sirve como transición entre la carretera y la propia estructura del puente. Su función principal es proporcionar una superficie de rodadura suave y continua, minimizando el impacto para los vehículos al pasar de la calzada al puente.

La losa de aproximación (ver figura 9), además ayuda a compensar los posibles asentamientos diferenciales entre el terraplén y el puente. Que pueden ser causados por variaciones en la compresibilidad del suelo bajo el terraplén y la subestructura del puente (Mora & Yasuda, 2011).

Figura 9. Losa de aproximación



Fuente: Falah & Muteb, 2023

1.2 Comportamiento estructural

La evaluación de la integridad estructural de los puentes constituye una vertiente crítica de la ingeniería civil, demandando una comprensión detallada del comportamiento de estas estructuras bajo un espectro diversificado de condiciones de carga. Esta sección busca abarcar únicamente algunas de las condiciones de carga más comunes en los puentes, centrándose en los puentes ferroviarios. Se abordarán tanto cargas estáticas, como dinámicas, que engloban desde las oscilaciones inducidas por el tráfico hasta impactos de cargas ambientales.

1.2.1 Cargas muertas

La carga muerta en un puente incluye el peso de todas sus partes estructurales, así como de accesorios. Entre ellos, el revestimiento del tablero, barandas, dispositivos de iluminación y señalización, tuberías de gas y agua, cables eléctricos y telefónicos (Chatterjee, 2008).

Cargas muertas típicamente utilizadas en el diseño de puentes convencionales ferroviarios de acero se presentan en la figura 10.

Figura 10. Cargas muertas en puentes ferroviarios.

Item	Dead Load	
Track (rails and fastenings)	200 lb/ft	300 kg/m
Steel	490 lb/ft ³	7850 kg/m ³
Reinforced and prestressed concrete	150 lb/ft ³	2400 kg/m ³
Plain (unreinforced) concrete	145 lb/ft ³	2320 kg/m ³
Timber	35–60 lb/ft ³	560–960 kg/m ³
Sand and gravel, compacted (railroad ballast)	120 lb/ft ³	1920 kg/m ³
Sand and gravel, loose	100 lb/ft ³	1600 kg/m ³
Permanent formwork (incl. concrete in valleys)	15 lb/ft ²	75 kg/m ²
Waterproofing on decks	10 lb/ft ²	50 kg/m ²

Fuente: Unsworth, 2017

Según Unsworth (2017), en los puentes ferroviarios convencionales, la carga muerta constituye una fracción relativamente menor de la carga total soportada por la superestructura. Esto se debe a que, de manera característica, estos puentes presentan una proporción significativamente alta de carga viva en comparación con la carga muerta.

1.2.2 Cargas vivas

Las cargas vivas en los puentes están asociadas al tráfico y se pueden definir como las fuerzas que no tienen carácter permanente y que se producen por el uso y ocupación de la estructura.

En el caso de los puentes ferroviarios, las locomotoras y el equipo, incluidos vagones cerrados y abiertos, góndolas para mercancías, tolvas y vagones cisterna, presentan una gran variabilidad en términos de peso, número y separación entre ejes. Las locomotoras de carga modernas disponen de dos conjuntos de tres ejes (bastidores) separados a una distancia de entre 1,96 m a 2,08 m, y una distancia entre los conjuntos de

ejes de 13,91 m a 16,66 m. El peso de estas locomotoras de nueva generación puede alcanzar hasta 200.000 kg. Sin embargo, también hay locomotoras de cuatro y seis ejes que pesan entre aproximadamente 115.000 kg y 180.000 kg, con longitudes de entre aproximadamente 15 m y 25 m que operan en la infraestructura ferroviaria (Unsworth, 2017).

También es relevante destacar que, aunque las cargas vivas incluyen las generadas por peatones, debido a la configuración específica del puente objeto de este estudio, estas no se consideran significativas.

1.2.2.1 Carga viva estática en puentes ferroviarios

La carga viva estática en puentes ferroviarios es esencial en el proceso de diseño y evaluación estructural. A diferencia de las cargas muertas, que son permanentes, las cargas vivas estáticas mantienen un estado estacionario durante su aplicación. Según la American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA, 2015), se aconseja que, para el diseño de puentes ferroviarios, se considere la carga viva basada en el modelo de carga Cooper's EM360 (E80). Este modelo, establecido por Cooper en 1894, se deriva de dos locomotoras de consolidación de tipo vapor, seguidas por vagones que ejercen una carga uniformemente distribuida.

El modelo Cooper's EM360 propone una carga máxima por eje de locomotora de 360 kN, complementada por una carga uniformemente distribuida de 120 kN/m sobre la vía. Aunque esta configuración puede percibirse como anticuada, particularmente en lo referente a la geometría de las locomotoras, AREMA sostiene que proporciona una estimación bastante precisa de los efectos de la carga máxima generada por el tráfico moderno de carga pesada.

1.2.2.2 Carga viva dinámica en puentes ferroviarios

El tránsito de equipos ferroviarios a lo largo de un segmento definido o dentro de una zona de influencia, induce variadas respuestas dinámicas en direcciones longitudinal, lateral y vertical, estrechamente asociadas con la dinámica del tren en movimiento. Según Unsworth (2017), se destacan entre estas las fuerzas longitudinales y las rotaciones de cabeceo, que se describen como giros alrededor de un eje perpendicular al eje longitudinal del puente, estas reacciones son provocadas por las fuerzas de frenado y tracción ejercidas por el tren.

El movimiento de guiñada, característico de las ruedas ferroviarias durante su operación, genera fuerzas laterales de considerable magnitud. Este efecto, resultado directo de la desviación angular entre la

dirección de la rueda y su trayectoria ideal, induce una dinámica compleja que puede afectar significativamente la estabilidad y la integridad estructural de la vía ferroviaria. Las fuerzas laterales surgidas de este movimiento no solo ponen a prueba la resistencia de los elementos de la vía, sino que también contribuyen a aumentar el desgaste mecánico de las ruedas y los rieles. Este incremento en las cargas laterales es particularmente relevante en curvas cerradas o en tramos de vía con irregularidades, donde el efecto de la guiñada se intensifica (Nitish & Singh, 2024).

En situaciones donde el diseño del puente incluye curvas, se manifiestan fuerzas centrífugas laterales, cuya incidencia y repercusiones han sido objeto de estudio en numerosas investigaciones, destacándose los trabajos de Kawashima & Penzien, (1979). Asimismo, el fenómeno de balanceo, (definido como rotaciones alrededor de un eje paralelo al longitudinal del puente) y las fuerzas dinámicas verticales surgen de una interacción compleja entre los componentes del vehículo, la configuración de la vía, la estructura del tablero y la superestructura del puente (Thomaidis et al., 2022).

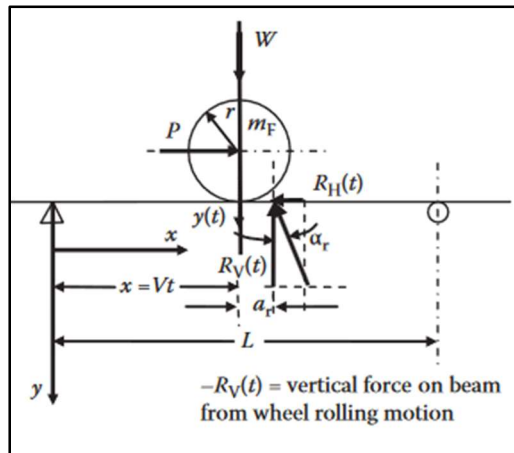
Este sistema de interacciones resalta la complejidad del análisis de la carga viva dinámica, subrayando la importancia de un enfoque integral en la evaluación de este tipo de respuestas.

1.2.3 Fuerzas longitudinales por tracción y frenado

Las fuerzas generadas por la locomotora durante las maniobras de aceleración (tracción) y desaceleración (frenado) afectan de manera significativa la distribución de esfuerzos a lo largo del puente. Mientras que las fuerzas de tracción suelen concentrarse en los puntos de conexión de la locomotora, las fuerzas de frenado se distribuyen a lo largo del tren, impactando el centro de gravedad de la carga viva. Estas fuerzas son particularmente intensas a bajas velocidades, donde la aceleración y desaceleración producen los mayores esfuerzos dinámicos (Otter, 2001).

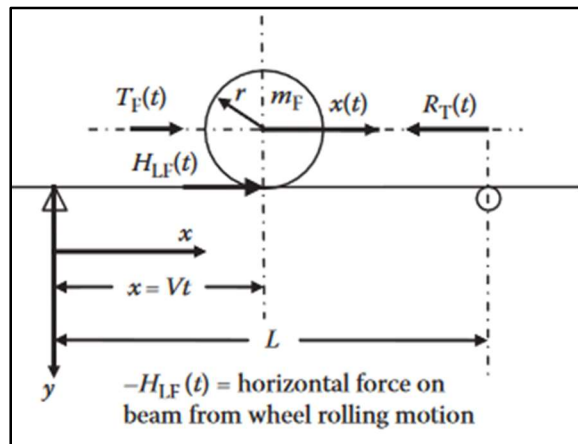
La Figura 11 muestra la influencia de las cargas verticales de un cuerpo rodante en un tramo simplemente apoyado, mientras que la Figura 12 ilustra la influencia de cargas horizontales. Finalmente, la Figura 13 presenta los efectos rotacionales de una masa rodante concentrada

Figura 11. Influencia de cargas verticales de un cuerpo rodante en un tramo simplemente apoyado



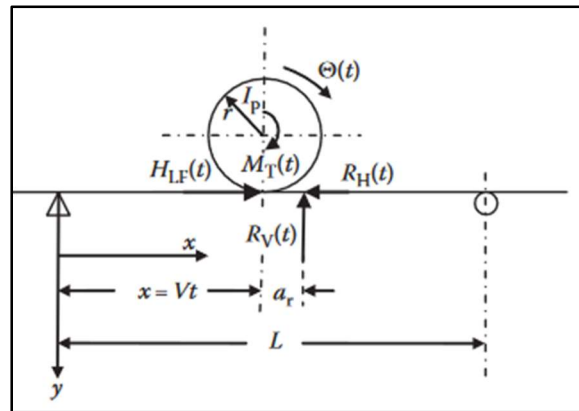
Fuente: Unsworth, 2017

Figura 12. Influencia de cargas horizontales de una masa rodante en un tramo simplemente apoyado.



Fuente: Unsworth, 2017

Figura 13. Efectos rotacionales de una masa rodante concentrada en un tramo simplemente apoyado.



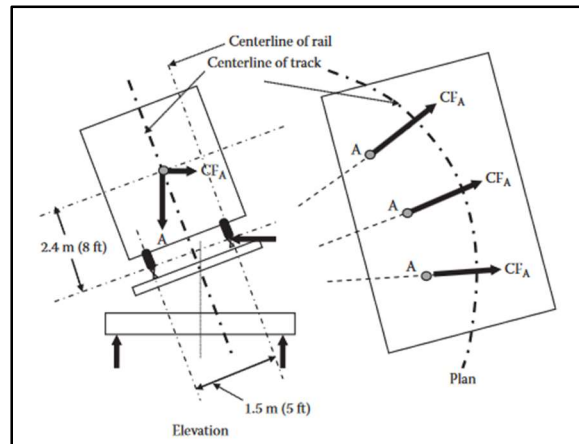
Fuente: Unsworth, 2017

En el trabajo de (Geißler et al., (2002) se resalta la importancia de considerar el efecto de estas fuerzas en el diseño de columnas y fundaciones de puentes, centrándose en el caso de un puente ferroviario ubicado en Rendsburg, Alemania.

1.2.4 Fuerza centrífuga

En este contexto, la fuerza centrífuga es una reacción que surge cuando un cuerpo en movimiento recorre una curva a una velocidad específica (ver figura 14). Este efecto, que actúa horizontalmente y de manera perpendicular al eje del centro de gravedad del objeto, es una manifestación de la inercia y es esencial para comprender las reacciones dinámicas de cargas en trayectorias curvilíneas.

Figura 14. Representación gráfica de la fuerza centrífuga en una vía.



Fuente: Unsworth, 2017

La expresión matemática que define la fuerza centrífuga para cada carga por eje es la siguiente:

$$CF_A = \frac{m_A V^2}{R}$$

CF_A la fuerza centrífuga actuando sobre cada eje. El término m_A es la masa asociada a la carga axial A dividida entre la aceleración de la gravedad g . relación entre la carga axial A y la aceleración de la gravedad g . La variable V , representa la velocidad lineal del tren y R , se refiere al radio de la curva por el cual se transita.

1.2.5 Acción lateral de irregularidades

El estudio de las fuerzas laterales en puentes ferroviarios es fundamental para la comprensión de la dinámica de cargas en estas estructuras, particularmente cuando se analiza el tránsito de trenes por segmentos de vía curvos. Dichas fuerzas incluyen no solo las resultantes de la acción centrífuga, sino también aquellas derivadas de irregularidades en la interacción entre la rueda y el riel, así como de diferencias en la rigidez de los componentes de la vía. Moreu et al., (2023) subrayan que el aumento en la carga y frecuencia del tráfico ferroviario, particularmente sobre infraestructuras envejecidas, puede provocar fuerzas laterales y desplazamientos de gran magnitud, incrementando así el riesgo de descarrilamiento y otros desafíos vinculados a la seguridad.

En este contexto, el estudio de Moreu et al. (2023) examina las cargas laterales y los desplazamientos especificados en los códigos de diseño, analizando las respuestas de puentes ferroviarios bajo el tráfico de servicio a partir de datos recogidos en campo.

Esta investigación destaca la importancia de complementar los modelos analíticos con información empírica para obtener una evaluación precisa de la capacidad de respuesta lateral de los puentes existentes. La metodología aplicada incluye la medición de fuerzas laterales mediante técnicas de instrumentación diversas.

En el estudio realizado por Nakai y Yoo (1988), se realiza una exhaustiva exploración de la teoría fundamental aplicable a vigas curvas, en contextos de análisis tanto estático como dinámico. Los autores subrayan la importancia crítica de comprender con precisión el comportamiento de este tipo de secciones estructurales. Esta comprensión se torna especialmente vital en un escenario caracterizado por el incremento en la aplicación de vigas curvas dentro de la ingeniería estructural.

1.2.6 Efecto del balanceo y fuerzas dinámicas verticales

El fenómeno de balanceo lateral en trenes en movimiento puede provocar un aumento significativo en las cargas verticales que actúan sobre las ruedas, lo cual, a su vez, puede incrementar los esfuerzos en los componentes de la vía. AREMA (2015) identifica este efecto de balanceo, denotado como RE, como un elemento integrante de la carga de impacto, IF, afectando así la distribución y la magnitud de las fuerzas en la infraestructura del puente.

La fórmula que representa la carga de impacto, considerando el efecto del balanceo, es la siguiente:

$$I_F = RE + I_v.$$

Por lo tanto, el efecto dinámico de carga se puede expresar como:

$$LE_D = (1 + I_F)[LE_S]$$

donde LE_D representa el efecto de carga de diseño, el cual incorpora tanto la respuesta dinámica como estática dentro de un marco de análisis elástico lineal y LE_S el efecto de carga estática.

Por otra parte, el equipo ferroviario puede balancearse o desplazarse lateralmente debido a fuerzas del viento, variaciones en el perfil de los rieles y diferencias en la rigidez de los resortes del equipo. Este movimiento, influenciado por las condiciones de los rieles y el equipo, incide en la magnitud de las cargas de los ejes del equipo y se considera como un aumento dinámico sobre la carga estática del eje. Los efectos del balanceo son independientes de la velocidad del tren y tienen un impacto en la carga viva vertical que soporta cada elemento de la vía.

El efecto de balanceo aplicado se representa como un par de fuerzas contrapuestas aplicadas a los rieles (una fuerza ascendente en un riel y una descendente en el otro) equivalente al 20% de la carga de diseño de la rueda. Estas fuerzas son resistidas por los componentes estructurales situados a cada lado del centro de la vía.

Unsworth (2017) subraya la importancia de considerar el efecto de balanceo al evaluar la respuesta dinámica de los puentes ferroviarios, ya que este fenómeno puede alterar sustancialmente las tensiones y la distribución de cargas a lo largo de la superestructura

1.2.7 Cargas ambientales

Las cargas ambientales representan un conjunto de fuerzas que actúan sobre los puentes debido a factores naturales como el viento, la temperatura y la actividad sísmica. Estas cargas pueden variar significativamente dependiendo de la ubicación geográfica y las condiciones climáticas, y deben ser cuidadosamente consideradas en el diseño y evaluación de puentes para asegurar su durabilidad y seguridad a largo plazo. A continuación, se describen los efectos específicos del viento, las variaciones de temperatura y las cargas sísmicas sobre las estructuras de los puentes.

1.2.7.1 Efecto de viento

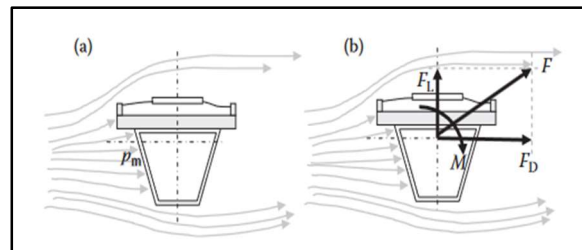
El impacto del viento sobre los puentes varía significativamente con el diseño y tamaño del puente. Mientras que los puentes de corta distancia pueden no verse significativamente afectados por las cargas de viento, estos efectos son fundamentales al diseñar tanto la superestructura como la subestructura de puentes de mayor envergadura (Lebet et al., 2013).

Las cargas de viento pueden actuar de tres maneras principales sobre los puentes: horizontalmente, transversal a la dirección del vano; horizontalmente, a lo largo de la dirección del vano; y verticalmente hacia

arriba, causando un efecto de elevación (ver figura 15). La relevancia de las cargas de viento en el diseño estructural se intensifica con el aumento de la longitud del vano del puente. Por lo tanto, solo en puentes de larga envergadura, las cargas de viento tienden a influir considerablemente en el diseño de la superestructura (Chatterjee, 2008).

Para puentes con una alta frecuencia natural de vibración, el efecto estático de la carga de viento es generalmente el principal factor por considerar. Sin embargo, para puentes con baja frecuencia natural, el efecto dinámico del viento y las oscilaciones que este causa se vuelven especialmente críticos, ya que pueden inducir vibraciones resonantes peligrosas.

Figura 15. Flujo de viento atravesando un cuerpo.



Fuente: Unsworth, 2017.

Los puentes de grandes luces y sistemas flexibles, como los de tipo colgante y atirantado, incorporan en su diseño consideraciones aerodinámicas sustanciales debido a su susceptibilidad a la acción del viento. Por el contrario, en los puentes ferroviarios de acero de tipologías convencionales, la influencia aerodinámica directa es generalmente despreciada. No obstante, es imperativo abordar los efectos aerostáticos del viento sobre la superestructura y la carga móvil, pues estos efectos deben considerarse en el diseño de sistemas de arriostramiento lateral, los cuales proveen estabilidad ante cargas transversales.

Al analizar la interacción del viento con estructuras sólidas, se observa que el flujo de aire constante y homogéneo, caracterizado por una velocidad de aproximación V_u , induce una presión dinámica local en estado estacionario, p_m , que se puede cuantificar mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli para la mecánica de fluidos.

De esta forma, la carga dinámica promedio, p , en un punto dado sobre la superficie de un cuerpo se define por la relación:

$$p = C_p p_m = C_p \left(\frac{1}{2} \rho V_u^2 \right)$$

Donde C_p es el coeficiente de presión promedio, derivado de la configuración geométrica de la estructura obstaculizadora, y p la densidad del viento.

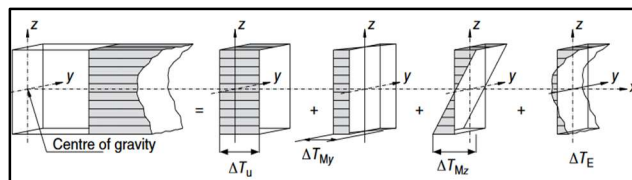
1.2.7.2 Variaciones de temperatura

Las variaciones de temperatura afectan los materiales de construcción de los puentes, causando expansión y contracción. Este fenómeno induce tensiones que son cruciales considerar en el diseño y evaluación estructural de los puentes (ver figura 16). Chatterjee (2008) señala la importancia de entender cómo las restricciones de construcción pueden limitar la expansión o contracción natural de los materiales por cambios térmicos, generando tensiones internas significativas.

La distribución de temperatura en la cubierta de un puente se define habitualmente a partir de valores especificados en las normativas. Sin embargo, en casos muy particulares, puede ser necesario desarrollar modelos numéricos para evaluar el campo térmico.

Normalmente, la distribución de temperatura en un puente se determina con base en normativas, pero situaciones excepcionales pueden requerir el desarrollo de modelos numéricos para una evaluación más precisa. Dentro de un elemento del puente, la temperatura ($T(z,t)$) se puede dividir en tres componentes: uno uniforme (ΔT_U), que no induce tensiones sino solo deformaciones y desplazamientos; uno lineal (ΔT_M , que varía de forma lineal y tampoco induce tensiones; y uno no lineal (ΔT_E), que sí genera un campo de tensiones auto equilibradas..

Figura 16. Descomposición de una distribución de temperatura no lineal.



Fuente: Reis & Pedro, 2019.

En estructuras estáticamente indeterminadas, los componentes uniforme y lineal de temperatura no causan deformaciones, ya que los desplazamientos longitudinales están restringidos, pero crean fuerzas

internas. Estas fuerzas se representan por la fuerza axial N_0 y el momento flector M_0 , que surgen debido a las restricciones de desplazamiento longitudinal y curvatura, respectivamente.

La fórmula para N_0 considera un cambio uniforme de temperatura a lo largo de la estructura, la rigidez axial (EA), y el coeficiente de expansión térmica (α). Por otro lado, M_0 calcula el momento flector causado por un gradiente lineal de temperatura a través de la altura de la sección transversal (h), utilizando la rigidez a flexión (EI).

Este efecto es especialmente relevante en estructuras continuas donde las restricciones verticales de los soportes introducen momentos adicionales

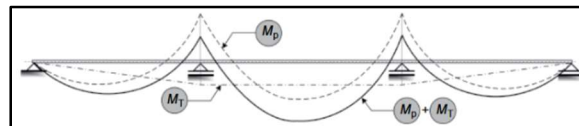
$$N_0 = EA\alpha\Delta T_U$$

$$M_0 = EI \left(\frac{\alpha\Delta T_M}{h} \right)$$

Para estructuras estáticamente determinadas, los componentes de temperatura uniforme y lineal solo resultan en deformaciones y desplazamientos, sin generar fuerzas internas ni tensiones. Los cambios de temperatura uniforme influyen principalmente el diseño de apoyos y juntas de dilatación, considerando los desplazamientos que estos cambios imponen.

La figura 17 muestra la interacción entre un gradiente de temperatura sobre un vano y el peso propio de la estructura.

Figura 17. Representación gráfica del momento flector ocasionado por la acción de cargas permanentes (M_p) y por la variación de temperatura lineal (M_t) en el tablero de un puente de tres tramos continuos.



Fuente: Reis & Pedro, 2019

1.2.7.3 Cargas sísmicas

En el análisis sísmico de puentes, las acciones sísmicas comúnmente se representan mediante equivalentes de fuerzas estáticas, un enfoque que es suficiente para estructuras pequeñas y sencillas. Sin embargo, para

una modelación más precisa, especialmente en puentes más complejos, se prefiere un análisis dinámico que utilice espectros de respuesta y registros temporales de movimientos sísmicos.

De acuerdo con Reis & Pedro (2019), los puentes, en términos generales, tienen un desempeño satisfactorio frente a terremotos de magnitud moderada. No obstante, en sismos de gran intensidad se han registrado diversos tipos de daño, tales como el colapso de cimientos debido a la licuefacción del suelo, afectaciones en los estribos, desprendimientos en la superestructura y daños en pilares o, más raramente, en la plataforma del puente.

Los daños en los estribos a menudo resultan de la sobrepresión dinámica del suelo contiguo o de las fuerzas transmitidas por la propia superestructura. La caída de elementos superestructurales generalmente ocurre cuando los apoyos del puente no están diseñados para tolerar los desplazamientos horizontales intensos provocados por los sismos. Además, los daños en los pilares suelen ser consecuencia de una insuficiente ductilidad de estos componentes vitales para la integridad estructural en situaciones de carga sísmica extrema.

Para calcular la carga sísmica estática equivalente $p(x)$, AREMA (2015) sugiere la siguiente expresión:

$$p(x) = C_n w(x),$$

donde C_n es el coeficiente de respuesta sísmica, que se define mediante la fórmula:

$$C_n = \frac{1.2ASD}{T_n^3} \leq 2.5AD$$

En esta expresión, A es la aceleración basal, S es el coeficiente del sitio, y D es el factor de amortiguamiento, calculado como:

$$D = \frac{1.5}{0.4\xi + 1} + 0.5$$

Por último, el período natural de vibración T_n y la frecuencia natural de la vibración ω_n están vinculados por la relación:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n}$$

1.2.8 Espectro de respuesta

El análisis del espectro de respuesta es fundamental para prever cómo un puente ferroviario, especialmente los de acero y con diseños más complejos, reaccionará ante un terremoto. Este método nos permite anticipar la máxima reacción del puente basándonos en su frecuencia natural, es decir, cómo vibra espontáneamente cuando se ve afectado por fuerzas externas, como un sismo.

Este espectro esencialmente captura una serie de posibles movimientos (vibraciones naturales) que un puente puede experimentar durante un terremoto, brindando así una representación más precisa del potencial sísmico. La Asociación Americana de Mantenimiento de Vías y Estructuras de Ferrocarriles (AREMA) del 2015 aconseja el uso de un espectro normalizado para estos análisis. Este ajusta las llamadas pseudo-aceleraciones (un término técnico para las aceleraciones amplificadas por las propiedades dinámicas del puente) al periodo de vibración de la estructura, delineando un enfoque riguroso para el diseño resistente a terremotos.

Este procedimiento es crucial, ya que permite a los ingenieros diseñar puentes ferroviarios que no solo resisten, sino que también están optimizados para absorber y minimizar el impacto de los sismos, garantizando la integridad y seguridad de la estructura en situaciones extremas.

1.2.9 Frecuencias naturales y modos de vibración

El análisis de la respuesta dinámica de puentes ferroviarios bajo diversas condiciones de carga es un pilar esencial en la ingeniería estructural moderna. La comprensión de los modos de vibración y las frecuencias naturales de estas estructuras es crucial, ya que permite identificar patrones de deterioro o irregularidades estructurales (Chopra, 2011).

Los puentes ferroviarios, como sistemas estructurales complejos, poseen características dinámicas únicas determinadas por sus modos de vibración y frecuencias naturales. Estas propiedades definen cómo vibra una estructura en respuesta a estímulos externos sin considerar las fuerzas de amortiguamiento. La identificación precisa de estos modos es fundamental para evitar fenómenos de resonancia que podrían llevar a fallos estructurales bajo cargas dinámicas específicas, tales como vibraciones vehiculares o terremotos.

El estudio de Eid et al., (2021) aporta un análisis detallado de cómo las vibraciones generadas por los vehículos afectan la respuesta dinámica de los tramos de puentes inclinados. Utilizando un enfoque de modelado avanzado, este trabajo subraya la influencia de la velocidad del vehículo, la pendiente de acceso al

punte, y la continuidad de los tramos en la amplificación de las respuestas dinámicas. Los hallazgos revelan la importancia de considerar estas variables en el diseño y mantenimiento de puentes para mitigar efectos adversos

Por otra parte, el trabajo de Carden & Fanning, (2004), complementa esta perspectiva destacando cómo el monitoreo basado en la condición de vibraciones se ha establecido como una herramienta valiosa en la detección de daños y en la evaluación de la salud estructural de puentes. Al analizar las características de vibración de una estructura, es posible identificar cambios en su comportamiento dinámico que podrían indicar la presencia de daños o degradación. Este enfoque no solo contribuye a una mejor comprensión de las propiedades dinámicas de los puentes sino también facilita el desarrollo de estrategias de mantenimiento más efectivas y económicamente eficientes.

1.3 Modelos estructurales

Los modelos en ingeniería estructural son herramientas esenciales que pueden servir para múltiples propósitos, desde el diseño inicial de una estructura hasta su análisis de rendimiento, optimización y mantenimiento. (Li et al., 2001). Los modelos estructurales permiten replicar el comportamiento de una estructura bajo diferentes cargas y condiciones ambientales, a raíz de esto es posible analizar la resistencia, rigidez, estabilidad y durabilidad de la estructura.

Mediante el modelado, los ingenieros pueden prever potenciales fallos y comportamientos críticos bajo condiciones normales y extremas, como sismos, fuertes vientos o cargas de tráfico. Un ejemplo destacado es el trabajo de Fei et al., (2011), quienes emplearon un modelo de elementos finitos (FEM) para el monitoreo de la salud estructural de las torres del puente colgante de Tsing Ma. Este modelo permitió una evaluación detallada del desempeño del puente, facilitando el diagnóstico y la predicción de su estado bajo diversas condiciones operativas y ambientales.

El modelado de estructuras facilita la simulación de escenarios de carga y condiciones específicas en los materiales. Kongshaug et al. (2021) ilustran cómo el modelado puede simular la reacción álcali-sílice (ASR) en un puente de concreto reforzado, demostrando la capacidad de estos modelos para replicar condiciones adversas que afectan a las estructuras, aun cuando la tipología de la estructura sea diferente a la estudiada en este proyecto.

Los modelos estructurales también son ampliamente utilizados en etapas de diseño, donde permiten explorar diversas configuraciones y materiales para identificar soluciones eficientes y económicas. Este proceso

de modelado garantiza que las estructuras no solo cumplan con los requisitos de seguridad y funcionalidad, sino que también resulten económicamente viables y optimicen el uso de materiales (Lin & Yoda, 2017).

En la ingeniería estructural, es común representar los componentes de una estructura de tres maneras principales, cada una adecuada para diferentes tipos de análisis y estructuras. A continuación, una descripción de cada una.

1.3.1 Modelos Frame

Los modelos de frame (ver figuras 18 y 19), también conocidos como modelos de barras, utilizan elementos lineales para simular estructuras compuestas por componentes esbeltos, donde las longitudes predominan sobre las dimensiones transversales. Estos modelos son particularmente efectivos para analizar columnas, vigas y elementos de cerchas, ya que facilitan el estudio de fenómenos como la flexión y la compresión axial. Dada su simplicidad relativa, facilitan el análisis, haciendo posible evaluar la respuesta estructural.

Figura 18. Representación de un modelo frame para una estructura de cercha con condiciones simples de apoyo en CSI Bridge.

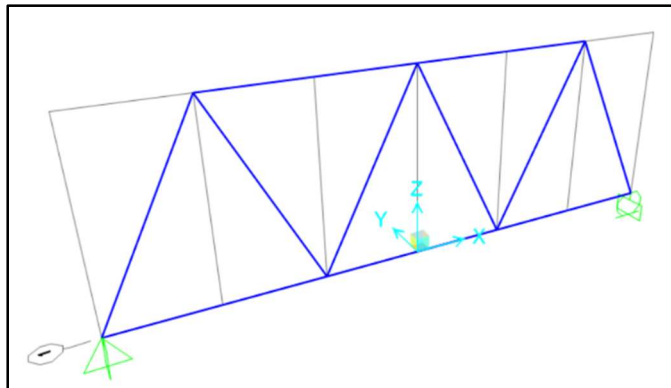
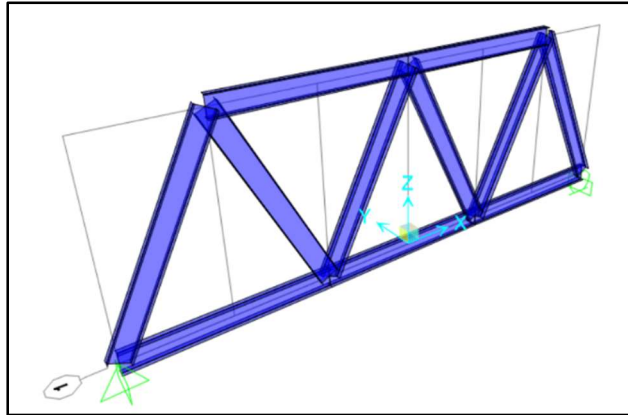


Figura 19. Vista de extrusión de un modelo tipo frame de estructura de cercha en CSI Bridge.



1.3.2 Modelos Shell

Utilizan elementos de dos dimensiones y se aplican a estructuras que se asemejan a una superficie con un espesor delgado en comparación con sus otras dos dimensiones (ver figuras 20 y 21). Este tipo de modelo es especialmente útil para analizar losas, muros y otros elementos estructurales que actúan principalmente en sus propios planos, como cubiertas y cascarones. Permiten estudiar la distribución de tensiones y deformaciones a lo largo de superficies extensas, abordando problemas de flexión y estabilidad en estructuras de geometría compleja.

Figura 20. Modelo tipo shell de una pared de concreto en CSI Bridge.

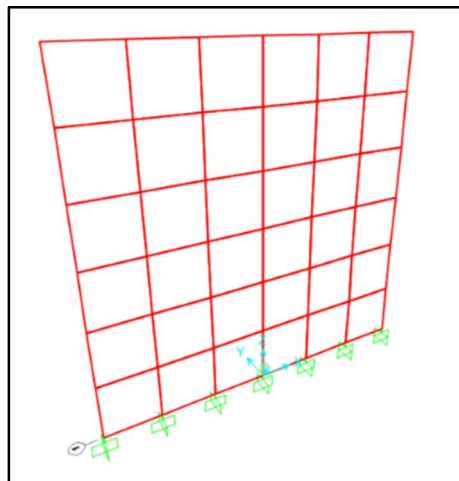
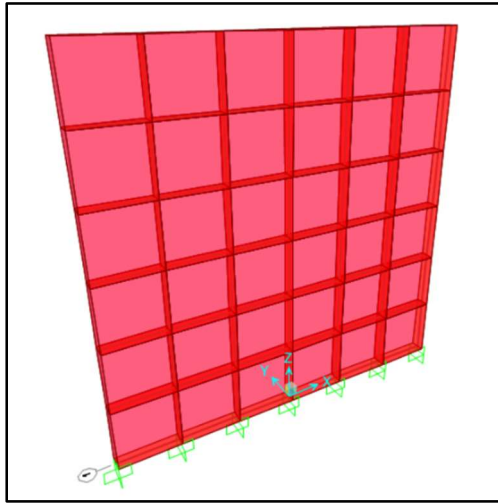


Figura 21. Vista de extrusión de un modelo shell de una pared de concreto en CSI Bridge.



1.3.3 Modelos Solid

Utilizan elementos tridimensionales para una representación detallada de las estructuras, permitiendo un análisis más específico de las interacciones entre tensiones y deformaciones en todas las direcciones (ver figuras 22 y 23). Son útiles para diseñar y analizar componentes sometidos a cargas complejas o en situaciones donde las condiciones de contorno son críticas, como en elementos de maquinaria, cimientos de equipos, o estructuras sujetas a cargas multidireccionales.

Figura 22. Modelo sólido de un muro de concreto en CSI Bridge.

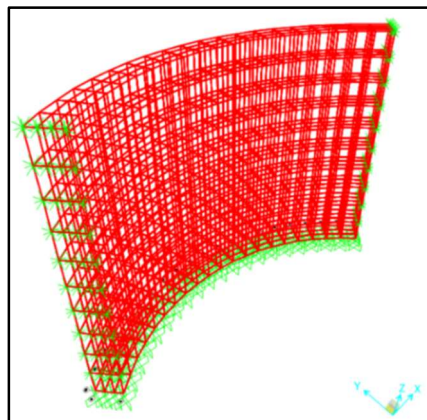
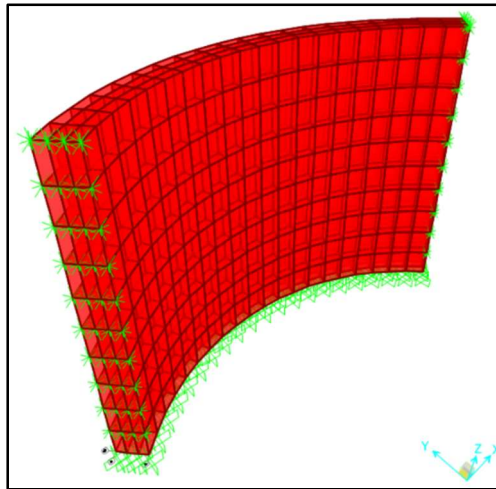


Figura 23. Vista de extrusión de un modelo sólido de muro de concreto en CSI Bridge.



En este software, al igual que en la mayoría de los programas de modelado, es posible definir las propiedades mecánicas y geométricas de cada elemento estructural ya sea una barra, una superficie o un volumen sólido. Además, facilita la especificación de las conexiones entre los elementos y las condiciones de apoyo. Este nivel de detalle avala que el comportamiento simulado de las estructuras refleje su respuesta real bajo diversas condiciones operativas.

Es fundamental reconocer que una misma estructura puede modelarse utilizando diferentes enfoques, cada uno proporcionando un equilibrio distinto entre complejidad y eficacia. La selección de un modelo depende de los objetivos específicos del proyecto y las características particulares de la estructura. Por ejemplo, algunos modelos pueden priorizar la precisión en los detalles estructurales, mientras que otros podrían enfocarse en una evaluación más generalizada pero más rápida y menos costosa.

Esta diversidad de modelos permite a los ingenieros elegir el enfoque más adecuado según las características estructurales y los requisitos de análisis, optimizando tanto el proceso de diseño como el de verificación de seguridad y funcionalidad estructural.

1.4 Daños típicos en estructuras de acero

El análisis y diseño de estructuras de acero, particularmente en infraestructuras críticas como puentes, requieren una comprensión profunda de los mecanismos de deterioro que afectan su integridad y longevidad.

Dos de los factores más significativos que contribuyen al deterioro de estas estructuras son la fatiga y la corrosión. Ambos fenómenos, aunque distintos en su naturaleza, comparten la capacidad de comprometer severamente la seguridad y funcionalidad de las construcciones de acero.

1.4.1 Fatiga

La fatiga es el deterioro gradual de una estructura bajo cargas cíclicas. Este fenómeno se manifiesta mediante la formación y propagación de grietas en puntos específicos de la estructura. De acuerdo con Alshoaibi (2023), la fatiga se desarrolla en tres etapas fundamentales:

- **Cambio de las propiedades mecánicas:** Esta etapa inicial ocurre en la microestructura del material, alterando sus propiedades mecánicas y electromagnéticas. Según Giannadakis & Varna (2009), la fatiga puede inducir la formación de microgrietas debido a la acumulación de daño en la estructura interna del material, lo que se refleja en el cambio de sus propiedades mecánicas
- **Nucleación de grietas:** Crucial en componentes de máquinas, se caracteriza por la aparición de grietas iniciales con superficies lisas y pulidas. En esta etapa, la propagación de las grietas es breve, culminando con la formación de microgrietas superficiales. Las grietas suelen formarse en zonas de concentración de tensiones, como en los concentradores de tensión, debido a la localización del esfuerzo en la microestructura del material, Picas et al., (2010).
- **Propagación de grietas:** Importante en componentes de construcción, las microgrietas se orientan perpendicularmente a la tensión principal. Eventualmente, solo una grieta principal continúa propagándose, mostrando superficies rugosas. Los concentradores de tensión, como hendiduras y soldaduras, juegan un papel significativo en esta etapa.

La fatiga se estudia principalmente de manera experimental utilizando dos enfoques principales: el método de Wöhler y la mecánica de fractura. El método de Wöhler, utilizado en el diseño de estructuras de acero y normado, se enfoca en la amplitud de la tensión y la relación entre esta y el número de ciclos que provocan la falla del material, lo que se describe en la curva de Wöhler. Por otro lado, la mecánica de fractura analiza la propagación de una grieta existente y determina la vida útil restante del componente.

La curva de Wöhler es esencial en estos estudios, ya que describe la relación entre la amplitud de la tensión y el número de ciclos que provocan la falla por fatiga del material, Susmel & Askes, (2012).

La mecánica de fractura, en cambio, se centra en la evaluación del crecimiento de grietas y utiliza modelos como la Ley de Paris para predecir la vida útil restante del componente Viththagan et al., (2023).

Estos enfoques son fundamentales para el análisis y diseño de estructuras sujetas a cargas cíclicas y variables, proporcionando herramientas para evaluar y predecir el comportamiento de los materiales bajo condiciones de fatiga.

1.4.2 Corrosión

La corrosión es uno de los principales mecanismos de deterioro que afectan a las estructuras de acero. Este proceso electroquímico, impulsado por factores ambientales y materiales, resulta en la degradación progresiva del metal, comprometiendo la integridad estructural y la seguridad de las construcciones. En el contexto de una infraestructura esencial como los puentes, la corrosión no solo reduce la vida útil de la estructura, sino que también aumenta los costos de mantenimiento y reparación, y puede llevar a fallos catastróficos si no se gestiona adecuadamente (Guo et al., 2019).

Tipos de corrosión comunes en estructuras:

- **Corrosión uniforme:**

Caracterizada por una pérdida uniforme de material en toda la superficie expuesta del metal. Aunque es más fácil de detectar y predecir, puede reducir significativamente la sección transversal efectiva de las vigas y, por ende, su capacidad portante (Bijen, 2003).

- **Corrosión localizada:**

La corrosión localizada puede manifestarse de dos formas principales: por picaduras e intergranular. La corrosión por picaduras forma pequeñas cavidades o agujeros en la superficie del metal que pueden profundizarse rápidamente, causando fallos localizados. Es especialmente peligrosa porque puede pasar desapercibida hasta que el daño es severo. Por otro lado, la corrosión intergranular afecta los límites de los granos del metal, debilitando la estructura desde el interior. Este tipo de corrosión es frecuentemente el resultado de tratamientos térmicos inapropiados y puede comprometer la integridad estructural sin que se note en la superficie (Rodrigues et al., 2021).

- **Corrosión Galvánica:**

Ocurre cuando dos metales diferentes están en contacto en presencia de un electrolito, como el agua salada. En esta situación, el metal más anódico se corroe más rápidamente. Este fenómeno es común en estructuras mixtas, donde diferentes tipos de metales se utilizan conjuntamente, y puede acelerarse con la

presencia de contaminantes industriales. La corrosión galvánica es un desafío particular en entornos marinos o industriales, donde los electrolitos están presentes de manera constante (Adey et al., 2019).

- **Corrosión Bajo Tensión (SCC):**

También conocida como SCC (Stress Corrosion Cracking), resulta de la combinación de tensiones mecánicas y un ambiente corrosivo. Las tensiones residuales o aplicadas en la estructura pueden acelerar la formación y propagación de grietas. Este tipo de corrosión es especialmente insidioso porque compromete la integridad de la estructura, haciendo que las grietas se propaguen rápidamente bajo la influencia combinada de tensiones y agentes corrosivos. SCC puede ocurrir en diversas condiciones de servicio, particularmente donde hay fluctuaciones de carga y exposiciones a ambientes agresivos (Ciolko, 2005).

1.5 Pruebas

La Universidad Técnica Checa ha llevado a cabo una serie de inspecciones detalladas, complementadas con análisis químicos y una combinación de pruebas tanto destructivas como no destructivas, con el propósito de caracterizar y evaluar los materiales de la estructura. Esta sección no pretende adentrarse en los detalles técnicos de la metodología y el análisis específico de cada prueba. Más bien, se enfoca en describir y proporcionar una visión general sobre las pruebas realizadas, delineando el alcance y la finalidad de estas evaluaciones dentro del contexto del estudio integral del puente.

1.5.1 Medidores de espesor ultrasónicos

Los medidores de espesores ultrasónicos son herramientas esenciales en la evaluación de la integridad y seguridad de estructuras metálicas y de otros materiales. Su funcionamiento se basa en la tecnología ultrasónica, la cual permite medir el espesor de un material de forma no destructiva (Abbas & Shafiee, 2018).

El funcionamiento de los medidores de espesores ultrasónicos se basa en la emisión de ondas sonoras de alta frecuencia que penetran en los materiales. Estas ondas son emitidas por un transductor conectado al medidor, que actúa como emisor y receptor de las ondas. Al contactar con el material, las ondas ultrasónicas se desplazan a través de este y se reflejan de vuelta al transductor al encontrar interfaces, como la pared opuesta del material o imperfecciones internas.

La velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas depende del material y de sus propiedades internas. El medidor calcula el tiempo que tardan las ondas en regresar al transductor y, usando la velocidad conocida de propagación en el material, determina el espesor del mismo. Este proceso permite evaluar no solo

el espesor sino también la presencia de corrosión, erosión o cualquier otro tipo de deterioro que pueda afectar la integridad estructural del material evaluado.

Figura 24. Medidor de espesor ultrasónico MT160 utilizado en pruebas a la estructura en estudio.



Fuente: CVUT, 2017.

Figura 25. Medidor de espesor ultrasónico TM280 utilizado en pruebas a la estructura en estudio.



Fuente: CVUT, 2017.

En el caso del puente en Záběhlice, se utilizaron los medidores de las figuras 24 y 25 para evaluar el nivel de corrosión de los elementos estructurales.

1.5.2 Evaluación de dureza y caracterización de los materiales.

La evaluación de la dureza y la caracterización de los materiales son fundamentales en el análisis de la integridad y durabilidad de las estructuras. En 2017 se llevaron a cabo pruebas de dureza en el puente en Záběhlice, empleando un durómetro portátil KT-C equipado con una sonda tipo D y basándose en el método de ensayo de dureza de Leeb (ver figura 26).

El ensayo de dureza de Leeb, es un enfoque que mide la dureza a través del principio de rebote, donde un dispositivo de impacto con una bola de tungsteno se proyecta contra el material en estudio. La medición de la velocidad de la bola antes del impacto y después del rebote permite calcular la dureza del material. La relación entre estas velocidades se convierte en unidades de dureza de Leeb (HL) mediante la fórmula:

$$HL = \left(\frac{V_r}{V_i} \right) \times 1000$$

Donde V_r , corresponde a la velocidad de rebote y V_i la velocidad de impacto.

Figura 26. Durómetro KT-C con sonda de tipo G.



Fuente: CVUT, 2017.

En este tipo de pruebas es importante eliminar las capas de corrosión y pintura de las superficies de interés, pues esto asegura que los resultados no se vean afectados por irregularidades superficiales y ubicar los puntos de medición en zonas representativas (Quispe et al., 2023).

En el caso del puente de estudio, se midieron las partes superior e inferior de las vigas principales y las columnas, estas áreas de medición se alinearon con los sitios de donde se extrajeron muestras para realizar pruebas de tracción, permitiendo así una comparación directa y significativa entre los resultados de dureza y los de resistencia a la tracción.

Además de la prueba de Leeb, para analizar las características de los materiales del puente, se recolectaron muestras de distintos componentes, incluyendo placas de refuerzo, elementos estructurales, tornillos y concreto, con el objetivo de examinar sus propiedades físicas y químicas.

1.5.3 Pruebas complementarias para la caracterización de materiales.

Para asegurar una comprensión integral de las propiedades de los materiales y su desempeño bajo diversas condiciones, se realizaron una serie de pruebas complementarias. Estas pruebas proporcionan información crítica sobre las características mecánicas y físicas de los materiales utilizados en la estructura del puente, permitiendo una evaluación exhaustiva de su integridad y durabilidad.

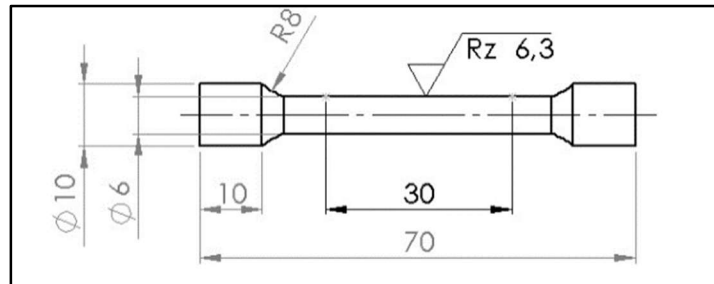
1.5.3.1 Pruebas de tracción.

Las muestras fueron sometidas a una variedad de pruebas. Entre ellas, destacan las pruebas de tracción, que se ajustan a la norma EN ISO 6892-1.

El objetivo de este ensayo es medir la resistencia y la ductilidad de los materiales metálicos bajo una carga uniaxial aplicada. Esto incluye la determinación de propiedades como el límite elástico ReH y ReL , la resistencia máxima a la tracción Rm , el alargamiento total A y el módulo de elasticidad E . La figura 27 detalla las dimensiones de la muestra bajo estudio.

Durante la realización del ensayo se aplica una carga axial a un ritmo controlado hasta que la muestra se fractura. El método de control de la tasa de carga puede ser basado en la deformación o la fuerza, dependiendo de los requisitos específicos de la prueba y del material.

Figura 27. Dimensiones de la muestra utilizada en la prueba de tracción



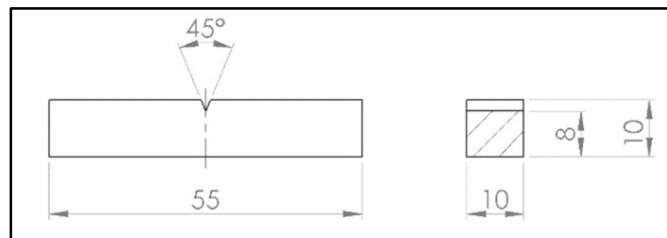
Fuente: CVUT (2017)

1.5.3.2 Pruebas de impacto de Charpy.

Las muestras también se sometieron a pruebas de impacto de Charpy (ver figuras 28 y 29). Estas son fundamentales para evaluar la tenacidad de los materiales, o su capacidad de absorber energía durante una fractura bajo condiciones específicas de velocidad y temperatura. De acuerdo con Reyes et al (2018), este tipo de prueba es crucial para identificar la vulnerabilidad de los materiales ante fracturas frágiles, particularmente en contextos donde el fallo a bajas temperaturas puede tener consecuencias críticas.

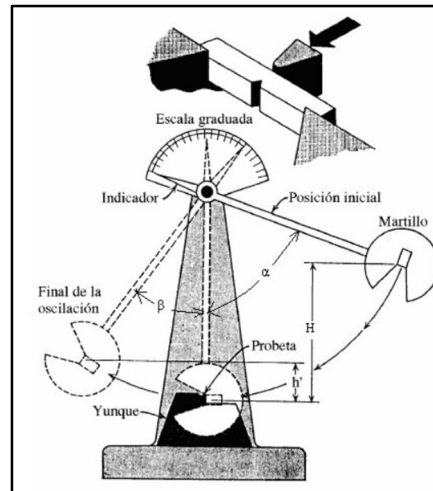
Durante el ensayo de Charpy, se utiliza una muestra con una muesca y se mide la energía absorbida en julios (J), que refleja la diferencia entre la energía potencial inicial del péndulo utilizado y su energía residual tras fracturar la muestra. Así, una menor absorción de energía indica una mayor propensión a la fragilidad, mientras que una mayor absorción señala una robustez más elevada.

Figura 28. Esquema de la muestra utilizada en la prueba de impacto de Charpy.



Fuente: CVUT (2017)

Figura 29. Esquema de péndulo utilizado en pruebas de impacto de Charpy



Fuente: Reyes et al (2018).

1.5.3.3 Pruebas de dureza Vickers

Las pruebas de dureza Vickers son una técnica de medición de la dureza material que se distingue por su capacidad para proporcionar resultados sobre una amplia gama de materiales, desde los más blandos hasta los más duros (Cheng et al., 2022). El ensayo utiliza una punta de diamante en forma de pirámide de base cuadrada y un ángulo de 136 grados entre caras opuestas para aplicar una carga definida sobre el material. La carga se aplica durante un tiempo específico, tras el cual se mide la diagonal de la impresión dejada por la punta en la superficie del material.

La dureza Vickers se calcula a partir del área de la huella y la carga utilizada, utilizando la fórmula:

$$HV = \frac{2F \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2}$$

Donde F es la fuerza aplicada, θ es el ángulo de la punta de la pirámide (136 grados), y d es la longitud media de las diagonales de la impresión en milímetros. Este método es particularmente valioso porque la huella pequeña permite realizar pruebas en componentes acabados y áreas microestructurales específicas, facilitando la detección precisa de variaciones en la dureza dentro de una misma pieza.

1.5.3.4 Análisis metalográficos

Los análisis metalográficos son cruciales para comprender la microestructura de los materiales metálicos (ASM International, 2019). Estos análisis implican la observación de una muestra de material bajo un microscopio metalográfico después de haber sido adecuadamente preparada, lo cual incluye cortar, montar, pulir y a veces atacar químicamente la muestra para revelar características microestructurales.

La observación microscópica permite identificar la disposición, tamaño, forma y distribución de los granos, las fases y otros defectos estructurales, como porosidad o inclusiones. Este tipo de análisis es fundamental para determinar cómo las propiedades mecánicas de un material, como la resistencia a la tracción y la tenacidad, están influenciadas por su estructura interna. También ayuda en la evaluación del procesamiento del material y su idoneidad para aplicaciones específicas.

1.5.4 Pruebas de cargas

Para evaluar el comportamiento estructural del puente bajo diferentes condiciones de carga, se pueden llevar a cabo una serie de pruebas de carga. Estas son esenciales para comprender cómo responde la estructura a las fuerzas aplicadas y para identificar posibles áreas de debilidad o deterioro.

1.5.4.1 Interferometría

La interferometría, una técnica avanzada basada en el principio de superposición de ondas, se ha utilizado también para evaluar la integridad estructural y monitorear los cambios en el puente situado en Záběhlce. Este método permite la medición de las diferencias en la longitud de trayectoria óptica entre dos o más ondas de luz, lo que resulta en patrones de interferencia. Estos patrones proporcionan información detallada sobre las características físicas del objeto bajo estudio, como la distancia, la forma, la rugosidad y el índice de refracción (Langenbeck, 2014).

En el caso específico del puente en Záběhlce, se aplicó la interferometría radar (InSAR) para realizar un seguimiento detallado de los desplazamientos verticales durante pruebas estáticas y dinámicas. La precisión de esta técnica fue fundamental para corroborar la consistencia de los resultados obtenidos con otras metodologías de medición.

Durante las pruebas, se observaron los desplazamientos verticales en respuesta a diferentes estados de carga, proporcionando una visión clara de la respuesta estructural del puente bajo condiciones variadas.

Estas mediciones fueron cruciales para validar la estabilidad y la seguridad de la estructura, además de identificar áreas potenciales de preocupación.

Los resultados obtenidos por radar de interferometría fueron comparados con mediciones realizadas mediante tecnología LVDT, demostrando una correspondencia significativa entre los métodos. Esta concordancia subraya la eficacia de la interferometría como herramienta de diagnóstico no destructivo en el campo de la ingeniería civil. Además, el análisis de los patrones de interferencia permitió el reconocimiento de movimientos en la estructura que no eran estrictamente verticales, destacando la capacidad de esta técnica para capturar la complejidad de los desplazamientos estructurales.

1.5.4.2 Pruebas estáticas y dinámicas

Las pruebas estáticas y dinámicas desempeñan un papel crucial en la validación de la durabilidad y funcionalidad de estructuras a lo largo de su ciclo de vida. Estos ensayos, fundamentales para comprender el comportamiento estructural ante diversas cargas y condiciones ambientales, ofrecen una visión detallada sobre la capacidad de las estructuras para soportar los desafíos presentados durante su operación (Sanayei & Onipede, 2012).

Las pruebas estáticas se centran en el análisis del comportamiento de las estructuras sujetas a cargas aplicadas de manera gradual, las cuales se mantienen sin cambios durante el tiempo de evaluación. Estos ensayos son esenciales para confirmar que la estructura puede soportar cargas permanentes, tales como su propio peso, asegurando su estabilidad y seguridad estructural. A través de estas pruebas, es posible analizar deformaciones resultantes de cargas específicas y determinar propiedades mecánicas críticas, incluyendo el límite elástico, la resistencia a la compresión o tracción, y el módulo de elasticidad.

En el trabajo de (Sanayei & Onipede, 2012), se ilustra la aplicación práctica de las pruebas estáticas en la evaluación de estructuras, al presentar un método analítico para identificar las propiedades de elementos estructurales a partir de datos de pruebas estáticas. Este método permite aplicar un conjunto de fuerzas estáticas a un conjunto de grados de libertad (DOF) y medir desplazamientos en otro conjunto de DOF. Utilizando este método analítico, las rigideces de los elementos estructurales se identifican utilizando las fuerzas aplicadas y los desplazamientos medidos, lo cual es capaz de determinar cambios en las rigideces de los elementos estructurales, incluyendo la falla de los elementos.

Por otro lado, las pruebas dinámicas examinan la respuesta de las estructuras, materiales o sistemas bajo condiciones de carga fluctuantes. A diferencia de las pruebas estáticas, estas cargas se aplican de forma rápida, variando en magnitud o dirección, para replicar condiciones reales de operación, tales como vibraciones, impactos y cargas cíclicas o repetitivas (Carden & Fanning, 2004).

Estas pruebas son indispensables para investigar la fatiga de materiales, medir respuestas vibratorias al identificar frecuencias naturales de vibración, y evaluar la resistencia de la estructura a vibraciones forzadas. Además, son utilizadas ampliamente para simular efectos ambientales y asegurar que las estructuras puedan resistir a las variaciones y desafíos presentados por su entorno. (Cunha et al., 2013).

Peng et al. (2023) resalta que la integración de estas pruebas con algoritmos inteligentes avanzados y otras metodologías puede mejorar aún más su precisión y eficiencia en la identificación de daños estructurales. Estos enfoques combinados ofrecen la posibilidad de analizar de manera más detallada y precisa la integridad estructural, facilitando la detección temprana de potenciales fallas y contribuyendo a la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo que pueden ayudar a prolongar la vida útil de las estructuras y a garantizar su seguridad operativa

Ahora bien, en el caso de la estructura en estudio se utilizaron distintos tipos de sensores y una estación de medición avanzada.

El estudio abarcó un amplio rango de mediciones, llevadas a cabo por un equipo conjunto de expertos de FSv ČVUT, INSET, y Vintegra, cada uno contribuyendo con su especialización y equipos específicos.

Deformaciones en acero y concreto: Se colocaron 18 sensores de deformación proporcional, utilizando tensores de 10 mm para acero y de 100 mm para el concreto reforzado.

Desplazamientos horizontales de apoyos: A través de tres sensores de desplazamiento potenciométricos, distribuidos en cada tramo del puente, se midieron los movimientos horizontales de los apoyos.

Desplazamiento relativo y flecha vertical: Se utilizó una combinación de cinco mediciones de desplazamiento relativo entre la estructura de acero y la placa de concreto, junto con tres mediciones de flecha vertical empleando cuerdas y dispositivos de medición de desplazamientos inductivos (ISD), para evaluar la deflexión vertical del puente bajo carga.

Medición indirecta de la flecha: Cuatro mediciones de inclinación ofrecieron una estimación indirecta de la flecha del puente, complementando las mediciones directas de desplazamiento vertical.

Radar de interferometría por Vintegra: Para una perspectiva adicional sobre la flecha vertical y en relación con la frecuencia propia de la estructura, se empleó la interferometría radar, correlacionando los puntos de medición con aquellos utilizados para la medición con cuerda.

Estas pruebas fueron ejecutadas luego de colocar los sensores en puntos críticos de monitoreo y simular el tráfico ferroviario real para aplicar cargas dinámicas, mientras que las cargas estáticas se mantuvieron constantes durante la evaluación.

Para aplicar las cargas, se utilizaron dos tipos de locomotoras: la ř. 363, con un peso total de 87 toneladas y una carga por eje de 21.75 toneladas, y la ASP Unimat 09-16/4S, pesando un total de 133.4 toneladas con 16 toneladas por eje, disponiendo de un total de 8 ejes. Además, se emplearon tres configuraciones distintas de trenes de carga, introduciendo variabilidad en las cargas aplicadas y permitiendo una evaluación comprehensiva del comportamiento estructural del puente ante diferentes escenarios de carga.

Capítulo 2: Metodología

Para comparar el comportamiento teórico y experimental del puente en Záhřeblice y evaluar el impacto de daños acumulados en su estructura. Se siguieron varias etapas metodológicas, integrando tanto técnicas de modelado estructural como análisis de datos experimentales y consultas con expertos en el campo.

En la fase inicial, se realizó una revisión bibliográfica enfocada en temas clave como el monitoreo de la salud estructural de puentes, la utilización de datos provenientes de pruebas estáticas y dinámicas, y la implementación de modelos estructurales para la evaluación de la condición de estructuras y la simulación de diversos escenarios de daño. Este abordaje bibliográfico tuvo como objetivo no solo adentrarse en el conocimiento existente sobre el modelado estructural sino también en identificar metodologías probadas y enfoques aplicables al estudio específico del puente en Záhřeblice.

2.1 Revisión de material previo

Para tener un panorama más claro del estado actual del puente y los tipos de daños que pueden afectar su integridad estructural, se revisaron informes técnicos y estudios previos proporcionados por la Universidad Técnica Checa. Además, se consultó con ingenieros especializados en el diseño y mantenimiento de puentes de acero para obtener una perspectiva profesional sobre los desafíos y soluciones potenciales.

Entre los materiales consultados se hallan:

Informes de Pruebas de dureza: Proporcionaron datos críticos sobre la resistencia y la durabilidad de los materiales empleados en la construcción del puente.

Protocolos de inspección: Ofrecieron una visión detallada sobre los procedimientos estándar adoptados durante las inspecciones regulares.

Análisis de materiales: A través de estos se evaluaron las propiedades físicas y químicas de los componentes del puente, esencial para comprender su comportamiento bajo diversas condiciones.

Diagnósticos de corrosión: Revelaron áreas de preocupación respecto a la degradación material, permitiendo priorizar intervenciones.

Planos estructurales y detalles de secciones: Proporcionaron información esencial sobre la geometría y la configuración estructural del puente, crucial para el análisis y el modelado.

Resultados de pruebas estáticas y dinámicas: Estos resultados ofrecieron una comparativa directa entre el comportamiento teórico y el observado en condiciones controladas, fundamentales para validar el modelo estructural.

Validaciones por interferometría: Aportaron precisiones sobre las deformaciones y desplazamientos, fundamentales para la evaluación de la salud estructural.

Dibujos técnicos en CAD: Facilitaron la visualización detallada y la revisión de las secciones estructurales, permitiendo ajustes precisos en el modelo.

Informes de recálculo de capacidad estructural: Proporcionaron un marco referente sobre la capacidad del puente y áreas de potencial refuerzo.

Aunque este trabajo no se centra en las etapas de diseño, se realizó una revisión de las normas europeas para el diseño de estructuras de acero y se consultaron textos especializados en diseño de puentes ferroviarios, destacando especialmente el libro "Design and Construction of Modern Steel Railway Bridges" de John F. Unsworth. Entre las normativas examinadas se encuentran:

EN 1990: Eurocódigo - Bases de cálculo estructural: Establece los principios y requisitos esenciales para la seguridad, servicio y durabilidad de las estructuras, proporcionando una base sólida para el diseño estructural.

EN 1991: Eurocódigo 1 - Acciones en estructuras: Ofrece directrices sobre las cargas y fuerzas a considerar en el diseño de puentes, incluyendo las cargas derivadas del tráfico ferroviario, esencial para la planificación de infraestructuras resilientes.

EN 1993: Eurocódigo 3 - Diseño de estructuras de acero: Especialmente relevante para los puentes de acero, detalla cómo diseñar componentes de acero asegurando su estabilidad, resistencia y ductilidad.

EN 1994: Eurocódigo 4 - Diseño de estructuras compuestas de acero y hormigón: Aplicable a puentes ferroviarios que emplean elementos compuestos, este código aborda la integración de acero y hormigón en el diseño.

EN 1998: Eurocódigo 8 - Diseño de estructuras para resistencia a los sismos: Crucial para el diseño en zonas sísmicas, ofrece pautas para incorporar la resistencia sísmica en las estructuras.

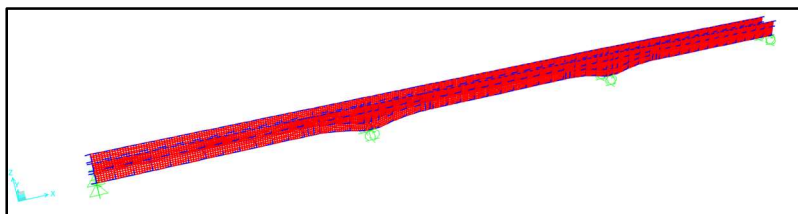
2.2 Creación del modelo estructural

Para modelar la estructura, se inició con un estudio de los planos de las secciones transversales y longitudinales, lo que permitió tener claridad de la geometría del puente.

Utilizando el programa AutoCAD, se procedió a diseñar varias propuestas de modelos estructurales. Estos diseños se basaron en la geometría detallada obtenida de los planos, asegurando que cada elemento del modelo reflejara las especificaciones técnicas del puente.

Una vez completados los diseños en AutoCAD, estos se importaron al software CSI Bridge. Dentro de este, se definieron y configuraron los soportes y las secciones que constituyen la estructura del puente. Se especificaron las restricciones en las uniones para garantizar que el comportamiento del modelo reflejara las condiciones reales de apoyo y conexión entre elementos estructurales. Además, se asignaron las propiedades físicas a los materiales, lo que incluyó parámetros como la resistencia, la densidad y la elasticidad, fundamentales para los análisis estructurales subsiguientes

Figura 30. Vista general del modelo de las vigas principales del puente.

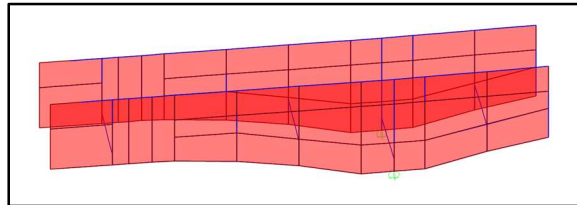


En el proceso de modelado de las vigas principales del puente, se seleccionaron elementos tipo shell y frame (ver figuras 30 y 31). Específicamente, el alma de la viga fue simulada mediante áreas de acero, cuyas

propiedades mecánicas y espesores fueron definidos previamente según especificaciones técnicas. Para modelar el alma de las vigas se utilizaron elementos tipo shell thick.

La elección de elementos tipo shell thick se debe a la inclusión de la deformación por cortante transversal en el comportamiento de flexión de la placa, característica que diferencia las formulaciones de shell thin y shell thick. La formulación thin sigue una aplicación de Kirchhoff, que descarta la deformación por cortante transversal, mientras que la formulación thick sigue a Mindlin/Reissner, que sí la considera.

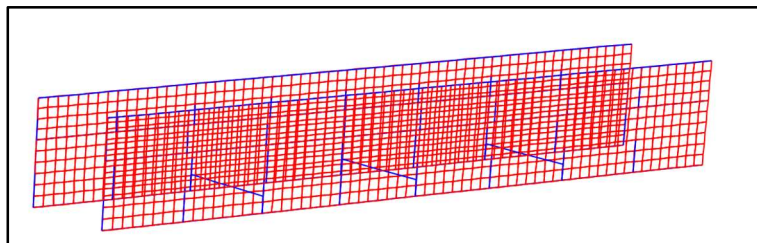
Figura 31. *Sección de vigas principales.*



Cada área metálica fue configurada para asegurar una adecuada conexión estructural entre el alma y los componentes adyacentes. Las alas de las vigas principales, junto con las vigas transversales y los rigidizadores tanto horizontales como verticales, se modelaron utilizando elementos tipo frame, los cuales se especificaron en función de las dimensiones reales de cada elemento.

Los elementos tipo shell se segmentaron en módulos con dimensiones máximas de 300 mm x 300 mm (ver figura 32). Este enfoque modular permite una evaluación detallada del comportamiento estructural de cada sección de las vigas, facilitando el análisis de las respuestas bajo diversas cargas y condiciones operativas.

Figura 32. *Detalle de la segmentación modular en las vigas principales.*



La conexión entre los apoyos del puente y las vigas fue modelada utilizando objetos de enlace lineal (linear links) que están fijos en todas las direcciones de movimiento. Un objeto de enlace conecta dos juntas, i

y j, separadas por una longitud L, permitiendo modelar comportamientos estructurales especializados. Se asignaron propiedades lineales a cada uno de los seis grados de libertad de deformacionales (DOF) internos al enlace, incluyendo axial, cortante, torsión y flexión pura.

En relación con la losa de concreto que se extiende sobre el puente, cabe destacar la inclusión de dos juntas de expansión situadas en los extremos de cada tramo, lo que resulta en un tablero de puente discontinuo. Para modelar esta estructura, se optó por simplificar el diseño del tablero utilizando elementos tipo shell thick (ver figura 33). Las zonas en contacto directo con las almas de las vigas se definieron con un espesor de 336 mm, mientras que las áreas restantes se establecieron con un espesor de 200 mm, para representar las juntas de expansión se creó una separación entre el tablero de cada tramo con una longitud de 5 cm (ver figura 34).

Figura 33. Vista de la losa de concreto sobre el tramo 1.

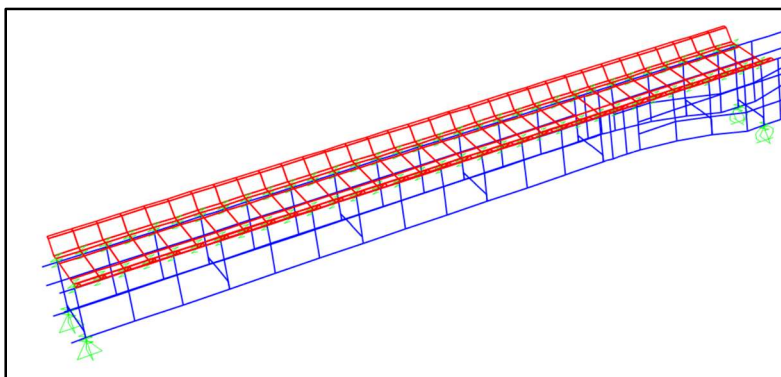
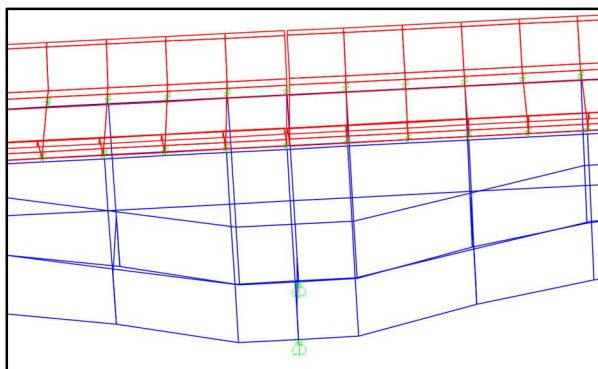


Figura 34. Detalle de la discontinuidad de la losa de concreto entre los tramos 1 y 2.



La modelación de las conexiones entre las vigas principales (girders) y el tablero del puente representó un desafío significativo, ya que el puente original no poseía elementos de conexión definidos. Para abordar esta

complejidad, se configuraron inicialmente las conexiones utilizando la función de enlaces especiales (special links) del software. Esta opción permitió una mayor libertad para editar y ajustar las variables de conexión, adaptándose mejor a las condiciones y requerimientos específicos del modelo.

El uso de enlaces especiales permitió simular diversas propiedades mecánicas y condiciones de comportamiento de las conexiones. Estos enlaces pueden ser configurados para representar un amplio rango de características de deformación y de rigidez, permitiendo ajustar las respuestas axial, cortante, torsional y de flexión de las conexiones.

Durante la fase de validación, se analizaron y ajustaron los valores finales de estas conexiones para asegurar que el modelo replicara de manera fiel el comportamiento estructural observado del puente.

Los ajustes específicos al modelo se comentarán en detalle en el apartado de validación.

2.2.1 Cargas aplicadas y validación

Para validar el modelo propuesto, se incorporaron resultados experimentales de pruebas estáticas y dinámicas llevadas a cabo por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Checa en 2018. Estas pruebas involucraron el uso de diversos tipos de sensores, incluyendo tensiómetros, extensómetros y transductores de desplazamiento lineal variable, con el fin de registrar mediciones de deformación, la variación temporal del esfuerzo mecánico y la aceleración, la ubicación de los sensores se muestra en las figuras 37 y 38.

El experimento principal consistió en medir el impacto de locomotoras transitando a diferentes velocidades sobre la estructura del puente. Las figuras 35 y 36 muestran una de las locomotoras utilizadas, así como un detalle con sus dimensiones. Para los fines de esta validación se consideraron exclusivamente los datos de desplazamientos.

Se definieron siete diferentes casos de carga, los cuales se describen a continuación:

- **ZS1:** La locomotora atraviesa el puente a una velocidad de 5 km/h en dirección a Vršovice.
- **ZS2:** La locomotora atraviesa el puente a una velocidad de 5 km/h en dirección a Krč, haciendo una parada de 30 segundos en el tramo 1.
- **ZS3:** La locomotora atraviesa el puente a una velocidad de 35 km/h en dirección a Vršovice.
- **ZS4:** La locomotora atraviesa el puente a una velocidad de 70 km/h, en dirección a Krč.
- **ZS5:** La locomotora atraviesa el puente a una velocidad de 5 km/h en dirección a Vršovice, realizando paradas de 30 segundos en los tramos 1 y 2.
- **ZS6:** Un tren de carga transita en dirección a Vršovice.
- **ZS7:** Un tren de carga se dirige hacia Krč.

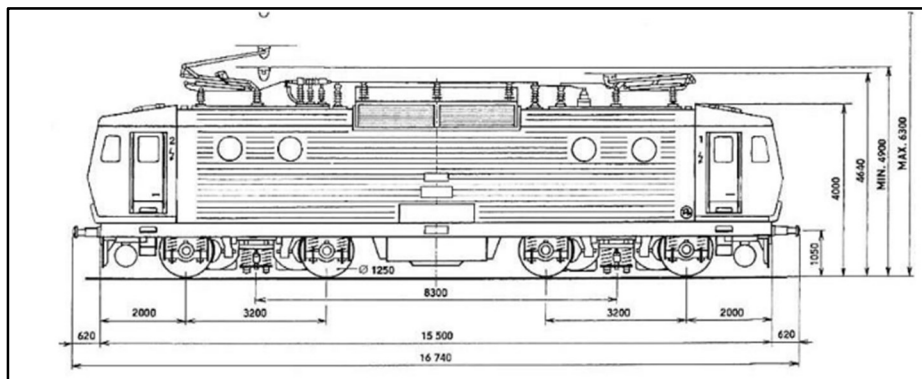
La figura 39 detalla la ubicación de los tramos donde se ubicaron las paradas de la locomotora para los casos de carga ZS2 y ZS5.

Figura 35. Modelo de locomotora řady 363, utilizada en las pruebas estáticas y dinámicas.



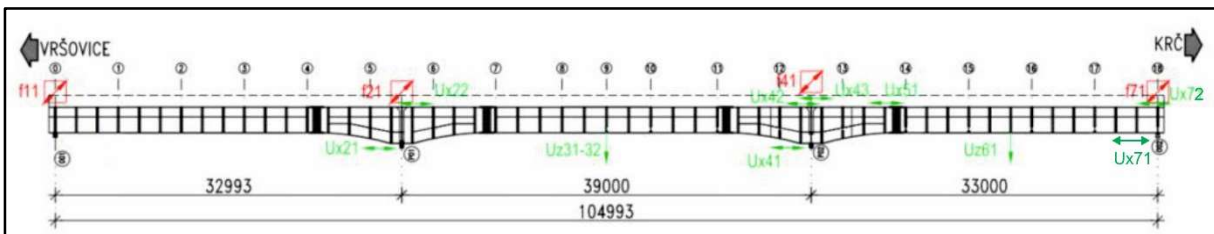
Fuente: CVUT, 2018

Figura 36. Detalle de las características de la locomotora utilizada en las pruebas.



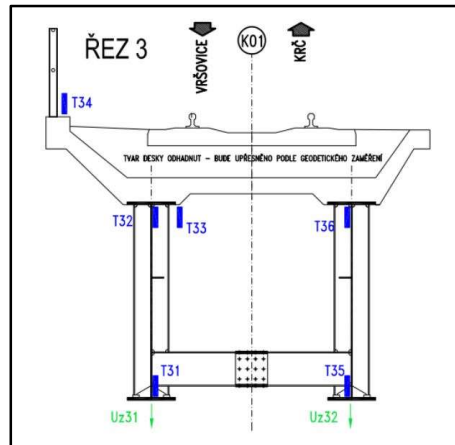
Fuente: CVUT, 2018

Figura 37. Ubicación de los sensores de deflexión en vista longitudinal del puente.



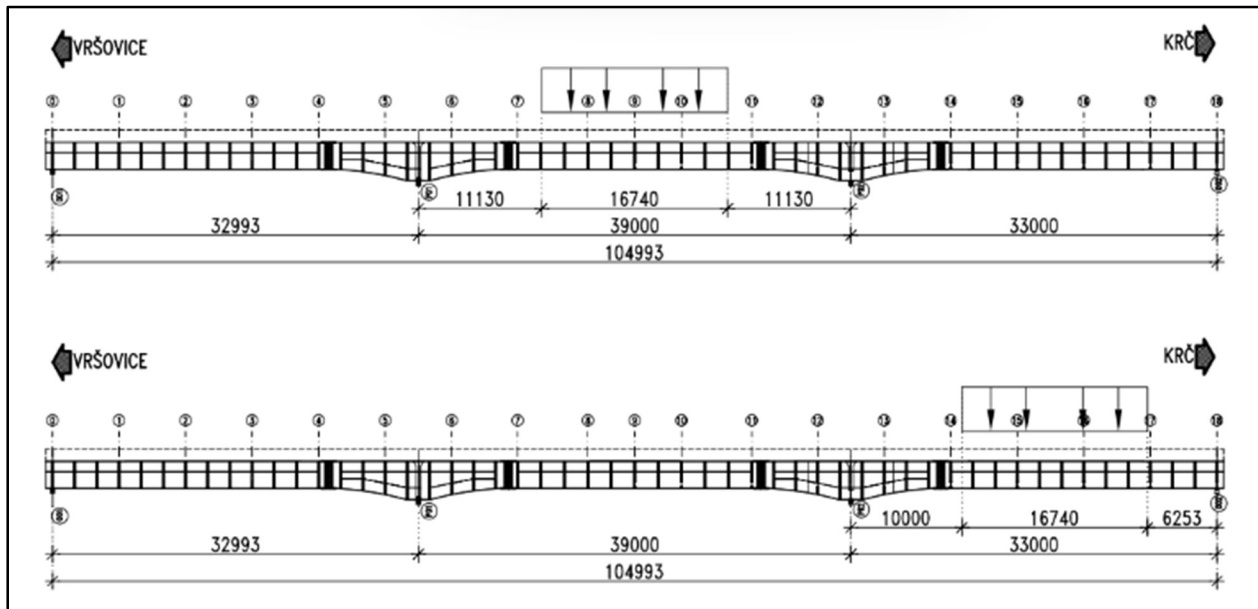
Fuente: CVUT, 2018

Figura 38. Ubicación de los sensores de deflexión en vista transversal del puente.



Fuente: CVUT, 2018

Figura 39. Ubicación de las paradas en los tramos del puente.

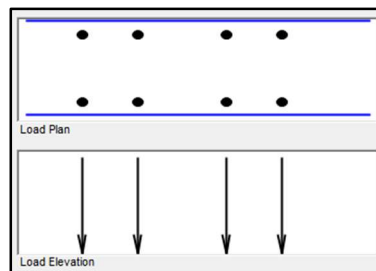


Fuente: CVUT, 2018

Utilizando las especificaciones técnicas de la locomotora, se estimó la fuerza ejercida por cada uno de sus ejes y las fuerzas adicionales impartidas por componentes del puente como el balasto, los durmientes, los rieles y las barandas. Estas cargas se aplicaron en el modelo computacional, y los resultados obtenidos fueron comparados con los datos experimentales para verificar la precisión del modelo.

En cuanto a las cargas, de acuerdo con las especificaciones de la locomotora, se estimó una carga por eje de 21.75 toneladas, la figura 40 muestra la distribución de cargas de la locomotora implementada en el software. Al tablero se le aplicó una carga promediada de 12 kN/m con el propósito de representar el peso del balasto y demás accesorios sobre el puente.

Figura 40. Distribución de las cargas de la locomotora sobre la vía.



Para la validación del modelo, se compararon los resultados experimentales de los casos de carga ZS1, ZS3 y ZS4 con los obtenidos por el modelo estructural. Este proceso consistió en comparar ambos conjuntos de datos y, a partir de las discrepancias encontradas, calibrar el modelo para asegurar una mayor precisión y una simulación más realista.

El proceso de validación incluyó los siguientes pasos:

- **Definición de escenarios de carga:** Se configuró un carril en el modelo que atravesaba el eje central del puente y, de acuerdo con las especificaciones de la locomotora, se ubicaron y definieron las cargas.
- **Comparación de resultados:** Las deformaciones predichas por el modelo para cada caso de carga se compararon con los datos obtenidos durante las mediciones llevadas a cabo por Vintegra y la Universidad Técnica Checa.
- **Calibración:** Se ajustaron la rigidez de las conexiones entre el tablero y las vigas principales, así como los parámetros de los materiales, para minimizar las discrepancias.
- **Prueba final:** Se verifica la precisión de los resultados una vez calibrado el modelo.

Inicialmente, el modelo mostraba valores de deformación que eran hasta 0.7 mm mayores que las deformaciones observadas experimentalmente. Para corregir esta discrepancia, se realizaron varios ajustes y modificaciones.

Primero, se ajustó el módulo de elasticidad del concreto del tablero a 30 GPa. Este ajuste fue necesario para reflejar adecuadamente las propiedades del material y su comportamiento bajo carga. Además, se ajustaron el límite de fluencia (f_y) y la resistencia última a la tracción (f_u) del acero de acuerdo con los datos experimentales obtenidos. Estos parámetros se alinearon con las propiedades medidas, garantizando que el modelo reflejara las características del material utilizado en el puente real.

Uno de los ajustes más significativos fue la inclusión de una capa de 5 cm de espesor de concreto utilizado como impermeabilizante. Esta capa extra se añadió para simular su uso en el puente real. El concreto de esta capa tiene un módulo de elasticidad de 15 GPa, que se incorporó en el modelo para simular su contribución a la rigidez global del sistema.

Con estos ajustes, el modelo se recalculó y se compararon los resultados con las deformaciones observadas experimentalmente. La inclusión de la capa de concreto impermeabilizante y los ajustes en las propiedades de los materiales resultaron en una disminución de las diferencias entre los valores simulados y los observados.

2.3 Simulación de daños

Para evaluar el impacto de los defectos en la integridad estructural del puente, se realizaron simulaciones de diversas situaciones que podrían comprometer sus elementos. Estas simulaciones incluyeron condiciones de corrosión, fatiga y daños en las conexiones en distintos miembros del puente.

Se aplicaron diferentes escenarios de carga para observar la respuesta del puente. En primer lugar, se evaluó la respuesta del puente cuando soporta únicamente sus cargas permanentes. Luego se analizó su comportamiento durante el tránsito de un tren y finalmente, se agregaron condiciones ambientales para simular un escenario más complejo.

El comportamiento del puente en estos escenarios se comparó tanto en condiciones sin daños como con los defectos mencionados, este análisis permitió identificar y analizar discrepancias en su capacidad

estructural, proporcionando una comprensión más amplia de su comportamiento bajo diversas condiciones adversas.

Se simularon los daños en distintas áreas críticas del puente, incluyendo las conexiones entre vigas transversales y vigas principales, apoyos y el punto medio de vigas principales, entre otras.

2.3.1 Fatiga

Para evaluar los efectos de la fatiga en el puente, se simularon grietas en las alas inferiores y superiores de las vigas principales (tanto en el lado izquierdo como en el derecho, ver figuras 41 y 42) y también en el alma de las vigas. La metodología utilizada se describió de la siguiente manera:

1. **Identificación de áreas críticas:** Se identificaron las áreas más susceptibles a la fatiga, centrandó la atención en las alas inferiores y el alma de las vigas principales, donde se espera que las tensiones cíclicas sean más severas.
2. **Modelado de grietas:** Para simular la presencia de grietas, se removieron secciones del modelo de elementos finitos tipo shell en las ubicaciones críticas identificadas. Esta técnica permite representar la reducción de la capacidad estructural debido a la propagación de grietas.
3. **Implementación en el modelo numérico:** Las secciones shell fueron modificadas en el modelo, eliminando las áreas correspondientes para reflejar las grietas simuladas. En el caso de las almas, se removieron áreas específicas, mientras que para los elementos tipo frame, se eliminó la conexión de manera que el elemento ya no es continuo. Esto implicó ajustar las propiedades geométricas y estructurales del modelo para considerar la pérdida de material y su impacto en la integridad estructural.
4. **Análisis de carga y comportamiento estructural:** Con las modificaciones aplicadas, se realizaron simulaciones bajo diversas condiciones de carga para evaluar cómo las grietas afectan el comportamiento global del puente. Se analizaron las distribuciones de fuerzas y deformaciones resultantes, así como la progresión de las grietas bajo cargas repetitivas.

En cuanto al área de agrietamiento, es importante destacar que las grietas 1 y 3 en la viga izquierda, así como la grieta 1 en la viga derecha, presentan un área de 15 cm². Por otro lado, la grieta 2 en la viga izquierda y las grietas 2 y 3 en la viga derecha tienen un área de 20 cm².

Las figuras 43 y 44 ejemplifican la metodología adoptada para el modelado de grietas.

Figura 41. Ubicación de grietas simuladas en el tramo 2, viga derecha

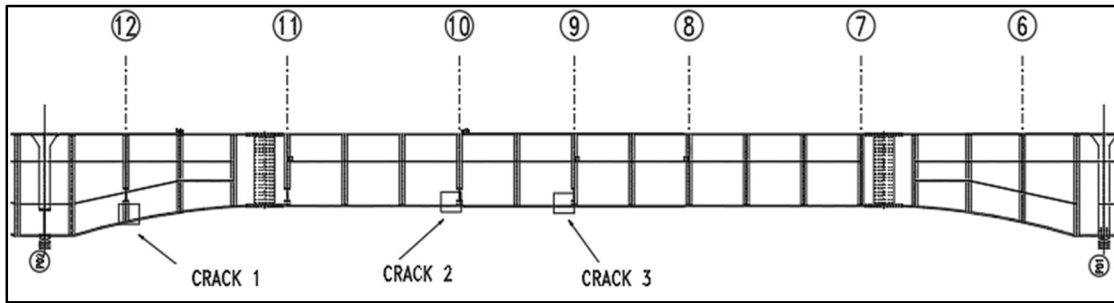


Figura 42. Ubicación de grietas simuladas en el tramo 2, viga izquierda

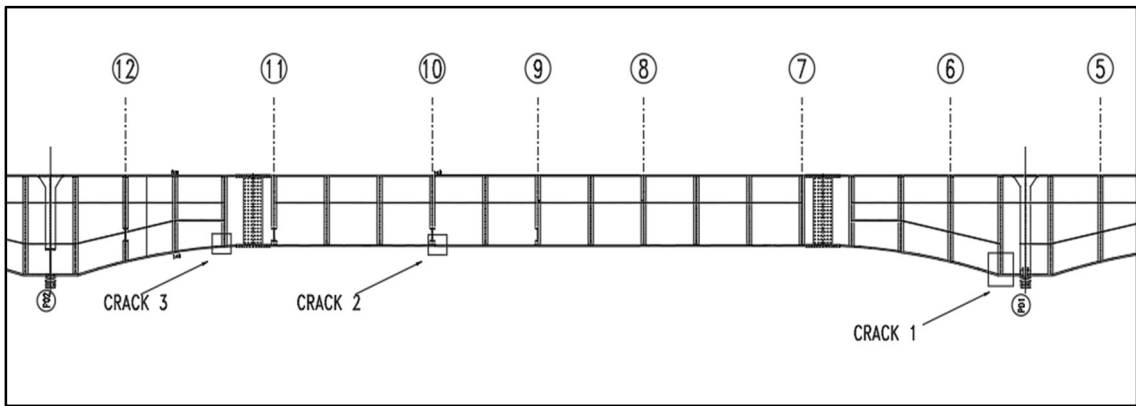


Figura 43. Detalle de grieta 1 en la viga izquierda

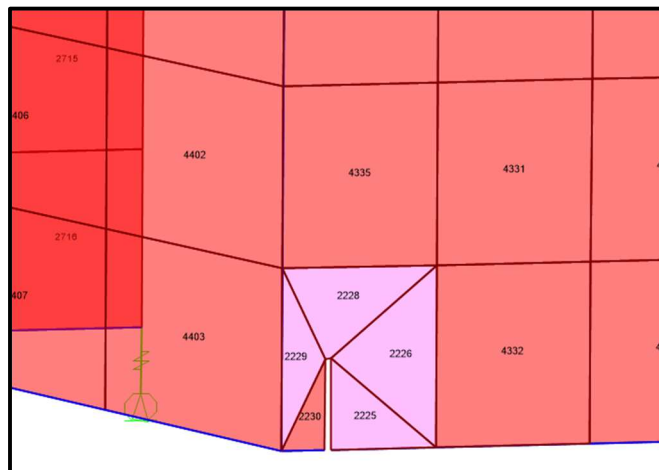
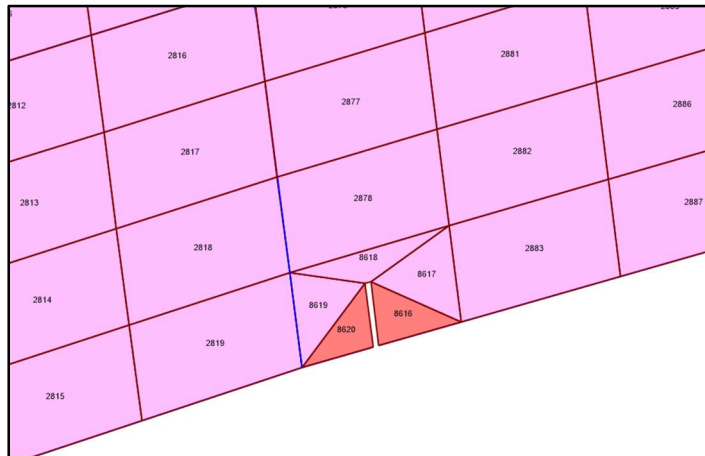


Figura 44. Detalle de grieta 2 en la viga izquierda



2.3.2 Corrosión

Para simular los efectos de la corrosión en el modelo del puente, se adoptó un enfoque simplificado que consiste en reducir el área transversal de varios elementos estructurales. Este método se basa en la premisa de que la corrosión disminuye la capacidad portante de los elementos al reducir su sección transversal efectiva. A continuación, se detallan los pasos seguidos en este proceso:

1. **Identificación de elementos críticos:** Se identificaron los elementos estructurales más vulnerables del puente que están expuestos a las condiciones más severas, concentrándose principalmente en las alas y el alma de las vigas principales.
2. **Determinación del grado de corrosión:** Se establecieron diferentes niveles de corrosión para cada elemento, se optó por implementar una reducción del 35% y 50% del área transversal de los elementos afectados. Estos niveles representan distintos grados de reducción de la sección transversal.
3. **Reducción del área transversal:** Para cada nivel de corrosión, se modificó el modelo numérico del puente reduciendo proporcionalmente el área transversal de los elementos afectados. Esta reducción se implementó directamente en las propiedades geométricas del modelo.
4. **Análisis de carga y respuesta estructural:** Con las modificaciones aplicadas, se realizaron simulaciones bajo diversas condiciones de carga para evaluar cómo la corrosión afecta el comportamiento del puente.

Específicamente para los casos de corrosión, se analizó la variación en el esfuerzo bajo dos escenarios: carga permanente y la combinación de carga permanente con carga térmica. La carga térmica se aplicó uniformemente a lo largo de las vigas, utilizando una temperatura de -10 grados Celsius. Esta implementación permitió evaluar cómo las bajas temperaturas afectan la integridad estructural del puente, considerando las deformaciones y tensiones inducidas por la expansión y contracción del material debido al cambio de temperatura a -10°C.

Las figuras 45 y 46 muestran la ubicación de las áreas de corrosión simuladas en cada una de las vigas principales del puente.

Figura 45. Áreas de corrosión viga derecha

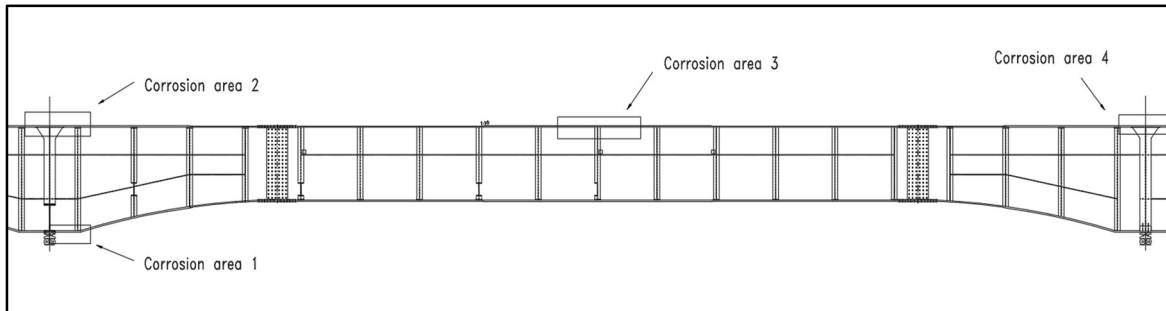
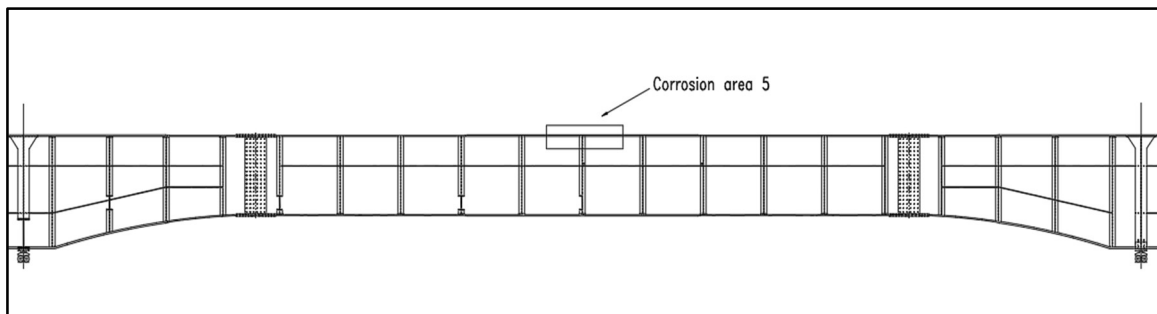


Figura 46. Área de corrosión viga izquierda



2.3.3 Daños en los apoyos

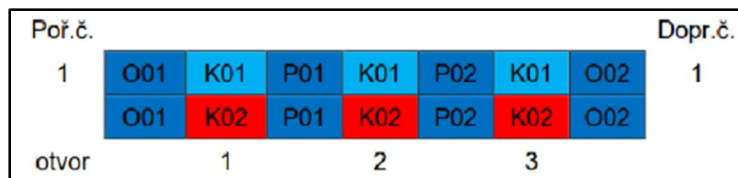
Para simular defectos en los apoyos del puente, se adoptó una estrategia que involucró la disminución de su capacidad para permitir el movimiento. La metodología utilizada para este análisis se describió de la siguiente manera:

1. **Selección de apoyos:** Se seleccionaron los apoyos del puente que están sujetos a mayores condiciones de deterioro.
2. **Simulación del deterioro mediante restricción de movimiento:** Para simular el deterioro de los apoyos, se modificó su capacidad de permitir desplazamientos. Originalmente diseñados para facilitar el movimiento relativo entre el puente y sus pilares, estos apoyos fueron restringidos para asemejarse a un apoyo fijo, limitando así su capacidad de absorber movimientos y deformaciones.
3. **Análisis de carga y comportamiento estructural:** Con las modificaciones aplicadas a los apoyos, se realizaron simulaciones bajo diversas condiciones de carga para evaluar cómo los defectos en los apoyos afectan el comportamiento global del puente. Se analizaron las distribuciones de fuerzas y deformaciones resultantes, así como los cambios en la respuesta estructural del puente.

Para evaluar el impacto de la restricción de movimiento en los apoyos, se sometió el modelo a diversas condiciones de carga, incluyendo cargas térmicas extremas (-10°C y 28°C), carga lateral de viento y carga permanente. Adicionalmente, se analizaron combinaciones de estas cargas para simular escenarios más comprometedores para la estructura.

Los apoyos restringidos se muestran en la figura 47 y corresponden a P02.

Figura 47. Esquema general del puente



Fuente: CVUT, 2017.

Capítulo 3: Resultados

En esta sección se incluye un informe detallado de los daños identificados en la estructura a partir de la revisión de documentos y pruebas, además se presentan los resultados de la validación del modelo estructural. Asimismo, se exponen los resultados de las simulaciones de diferentes escenarios de daño, analizando su impacto en el comportamiento estructural del puente.

3.1 Informe característico de daños

En esta sección se abarca la caracterización de los daños observados en el puente de acero de Záběhlce. A través de un análisis, se evalúan las condiciones actuales de la estructura y se identifican áreas que requieren atención prioritaria. La caracterización se basa en datos recopilados a través de inspecciones visuales y pruebas estructurales.

Los hallazgos derivados de esta caracterización son útiles para orientar las decisiones de mantenimiento y reparación, asegurando que el puente pueda continuar operando de manera segura y eficiente.

3.1.1 Vigas principales

La viga principal del puente es una estructura de sección I soldada, cuya configuración varía a lo largo de su extensión. En los tramos extremos (1 y 3), la viga posee un alma con una altura constante de 2400 mm, mientras que el grosor de las alas fluctúa entre 36 y 50 mm. En el tramo central (2), el alma también mide 2400 mm de alto, pero las alas tienen un grosor que varía entre 36 y 45 mm. El grosor del alma en estos tramos es de 14 mm. Encima de los pilares, la sección de la viga cambia: la altura del alma se incrementa hasta 3400 mm y el grosor del alma se ajusta a 18 mm.

La viga principal está adicionalmente reforzada con un refuerzo longitudinal de ancho 150 mm y se extiende a lo largo de dos tercios de la altura de la viga por su interior. En zonas sujetas a momentos negativos, se ha incorporado refuerzo longitudinal adicional. La reparación de las fisuras por fatiga realizadas en 1982 en el tramo 1 está en buen estado, y la protección superficial no está dañada. La figura 48 por su parte, muestra un detalle de los refuerzos verticales utilizados a lo largo de la estructura.

Figura 48. *Detalle de los refuerzos verticales.*



Fuente: CVUT (2017)

Los puntos críticos de la viga principal se localizan en los soportes, donde la presencia de juntas de expansión en la placa de concreto facilita la infiltración de agua, provocando corrosión localizada y debilitamiento de la estructura en estas áreas (ver figura 49). En el resto de la viga, predominan el desprendimiento de la pintura y signos iniciales de corrosión superficial que no afectan significativamente la integridad estructural, ya que no penetran profundamente en el material.

Figura 49. *Corrosión local en el extremo de la viga principal, cerca del apoyo O02 debido al agua que gotea.*



Fuente: CVUT (2017).

El borde del ala superior de la viga principal, donde se une con la placa de concreto, está afectado por la corrosión. Precisamente en esta unión se observan lixiviaciones causadas por las grietas en la placa de concreto, donde el debilitamiento local por corrosión alcanza hasta 5 mm.

La estructura presenta tres focos de corrosión pítica: bajo las grietas en la placa de concreto, bajo las juntas de expansión y en los extremos de las vigas. Estos sitios suelen tener un tamaño de aproximadamente 10x10 cm (ver figura 50).

Figura 50. Foco de corrosión cerca del pilar P02.

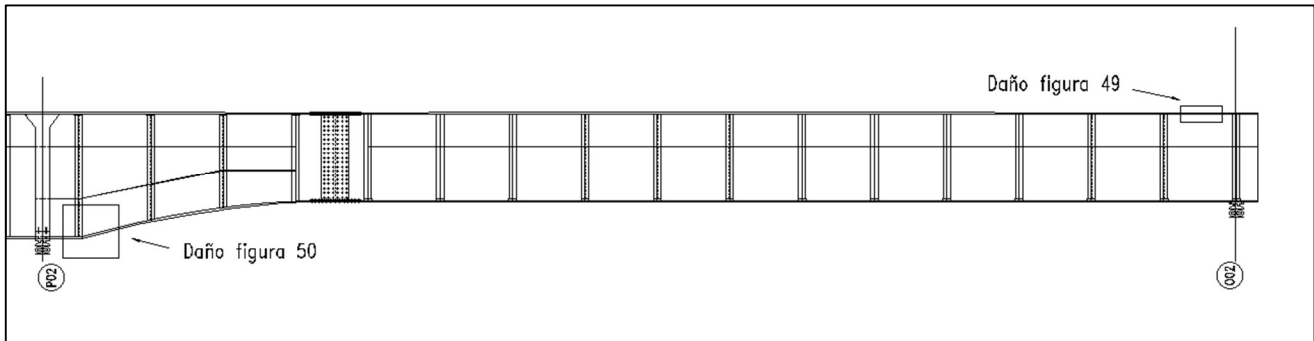


Fuente: CVUT (2017).

Los peores lugares con pérdidas locales de hasta 10 mm se encuentran en la superficie superior de la viga principal cerca del pilar bajo la junta de expansión, en el refuerzo sobre el pilar y en los soportes alrededor de los tornillos de los apoyos.

La figura 51 muestra un esquema con los daños presentados en las figuras 49 y 50.

Figura 51. Esquema de la ubicación de los daños mostrados en las figuras 49 y 50



3.1.2 Vigas transversales

En el puente hay tres tipos diferentes de travesaños o vigas transversales. Sobre los soportes (O01, O02) están formados por perfiles I soldados de 625 mm de altura. En los tramos están formados por perfiles I soldados de 428 mm de altura y sobre los pilares por perfiles I de 906 mm de altura. Los travesaños sobre los oportes actúan como semi-marco de refuerzo que transfiere la carga a los apoyos, por esta razón el refuerzo interno está expandido.

No hay daños graves ocasionados por corrosión en estos elementos, sin embargo se observa desprendimiento en el recubrimiento y la corrosión penetra en alas inferiores (ver figura 52).

Figura 52. Corrosión pítica en viga transversal.



Fuente: CVUT (2017).

3.1.3 Apoyos

El recubrimiento protector de los apoyos está dañado aproximadamente en las siguientes proporciones: O01 en un 20%, P01 en un 30%, P02 en un 30%, y O02 en un 40% de la superficie. Individualmente, la corrosión penetra en la superficie (ver figura 53). El plomo de las almohadillas está siendo expulsado tanto en las placas superiores como inferiores. Además la infusión de concreto de los apoyos está agrietada y suelta.

Figura 53. Tornillo de acoplamiento faltante en apoyo O02.



Fuente: CVUT, 2017

3.1.4 Tablero del puente

La superficie del puente está compuesta por un canal de concreto reforzado, que también actúa como refuerzo transversal de la estructura principal. Tiene un espesor de 200 mm y no está conectada a las vigas principales. El espesor de lecho de rodadura es de aproximadamente 500 mm y tiene juntas de expansión sobre los pilares.

Sobre el tablero hay numerosas grietas transversales con anchos de hasta 1 mm. En muchos lugares, hay filtraciones de agua y lixiviación del aglutinante. La cobertura no es suficiente, y en toda la superficie, la armadura corroída es visible. En muchos lugares, la capa de cobertura se ha desprendido, exponiendo el acero de refuerzo. Estos defectos cubren aproximadamente 1 m². La degradación del concreto localmente alcanza profundidades de 50-60 mm (ver figuras 54 y 55).

Figura 54. Fisura desde la vista inferior de la losa de concreto reforzado.



Fuente: CVUT, 2017

Figura 55. Armadura de la losa expuesta a la corrosión



Fuente: CVUT (2017)

Los bordes de las cornisas están rotos en muchos lugares. Las juntas de dilatación están abiertas con los bordes dañados por el agua que fluye (lixiviación).

De acuerdo el Ing. Jan Vůjtěch (2017), la estructura del puente no presenta un impacto significativo por la corrosión. Aunque existen depósitos locales de corrosión, estos no han afectado hasta ahora la integridad de los elementos estructurales. Sin embargo, el revestimiento protector de la estructura se encuentra deteriorado y probablemente al final de su vida útil. La confiabilidad del puente se ve más comprometida por los tornillos agrietados en las uniones que por el debilitamiento debido a la corrosión (ver figura 56). Además, la degradación

adicional de la losa del puente, especialmente en las zonas sobre los pilares donde la losa está dilatada, podría acelerar el proceso de corrosión. Aunque actualmente el puente es completamente funcional desde el punto de vista estático, es esencial realizar una renovación del revestimiento protector y de la impermeabilización, así como reparar la losa de concreto reforzado para mantener su funcionalidad.

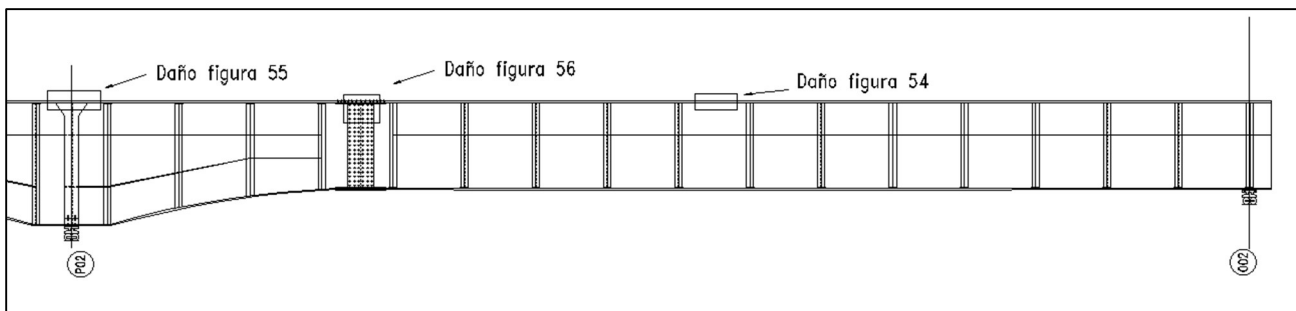
Figura 56. Tornillos faltantes en unión de la viga principal izquierda.



Fuente: CVUT (2017)

La figura 57 muestra un esquema con los daños presentados en las figuras 55 y 56.

Figura 57. Esquema de la ubicación de los daños mostrados en las figuras 54, 55 y 56



3.2 Validación del modelo

Los siguientes gráficos muestran el comportamiento de la deformación en función del tiempo para los nodos 2972 y 2973 del modelo. Estos nodos corresponden a la ubicación de los sensores durante el experimento, situados en la mitad del segundo tramo bajo el ala inferior de las vigas principales. Se presentan gráficos para cada escenario de carga.

Figura 58. Gráfico deformación vs tiempo para el caso ZS1, nodo 2972

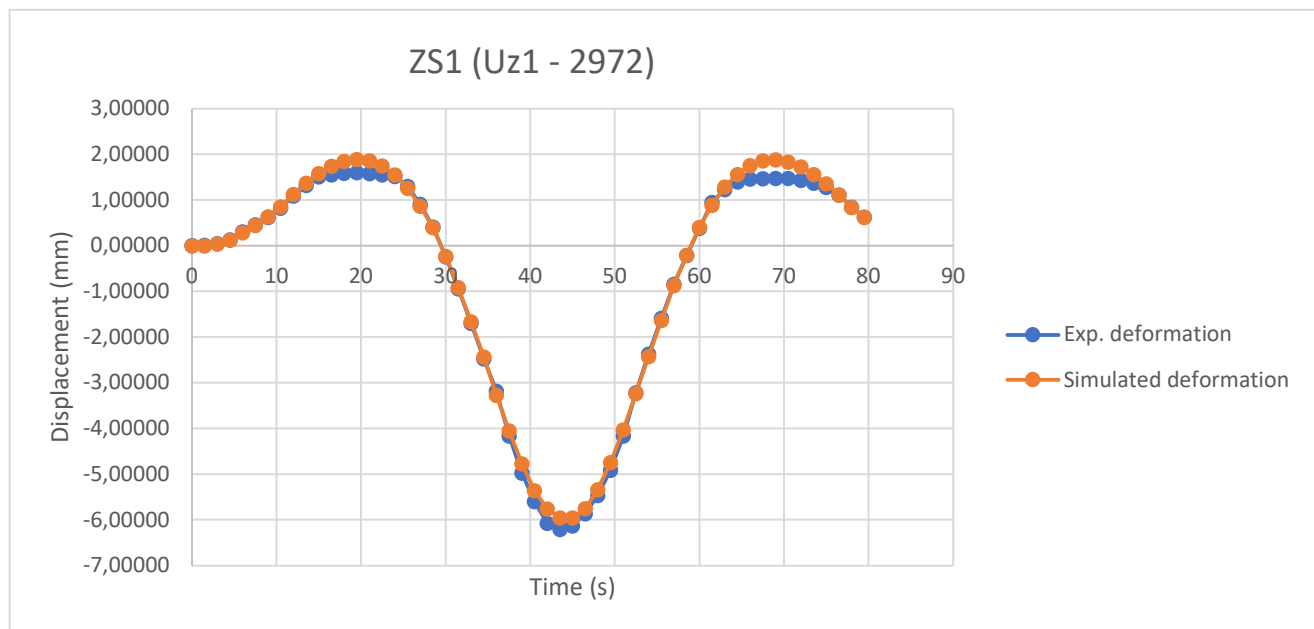


Figura 59. Gráfico deformación vs tiempo para el caso ZS1, nodo 2973

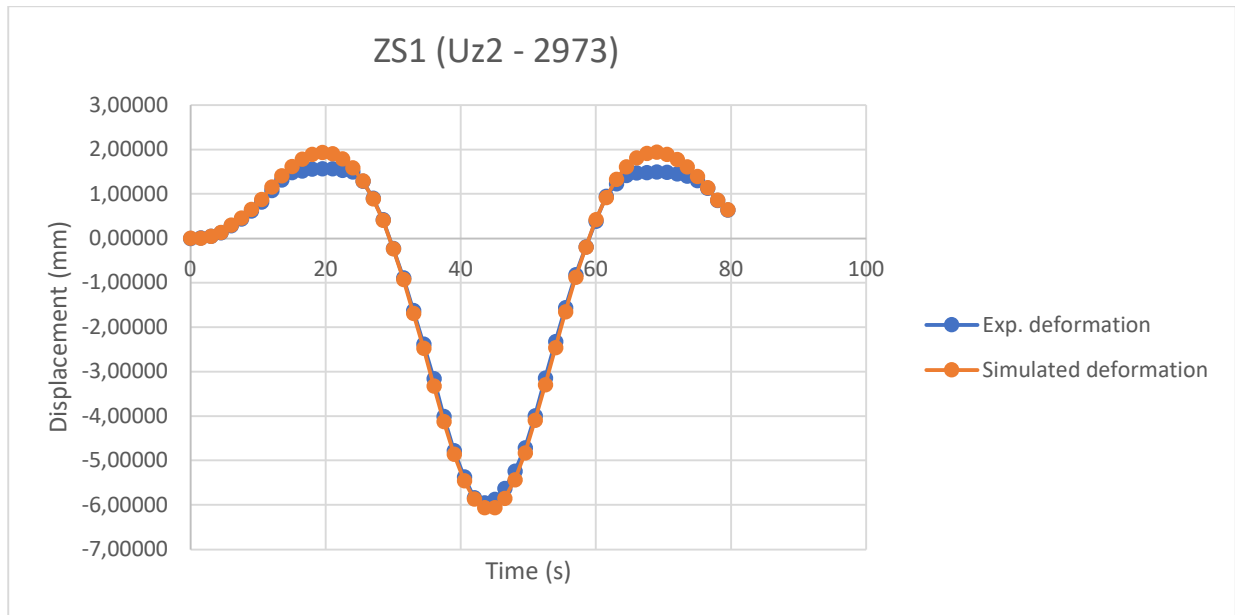


Figura 60. Gráfico deformación vs tiempo para el caso ZS3, nodo 2972

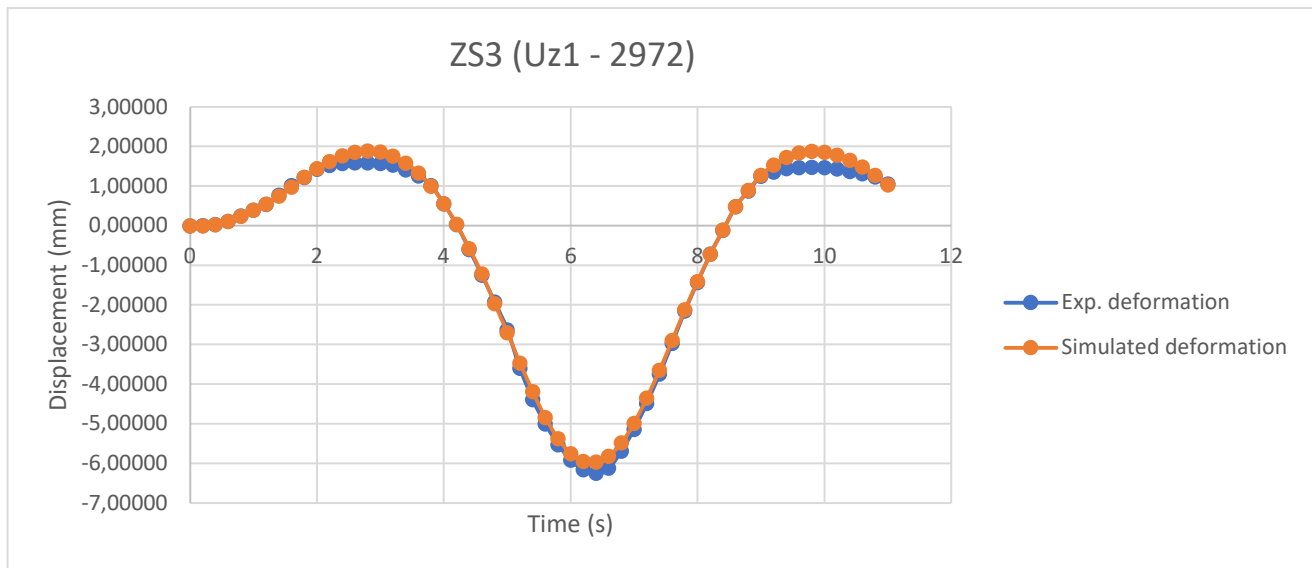


Figura 61. Gráfico deformación vs tiempo para el caso ZS3, nodo 2973

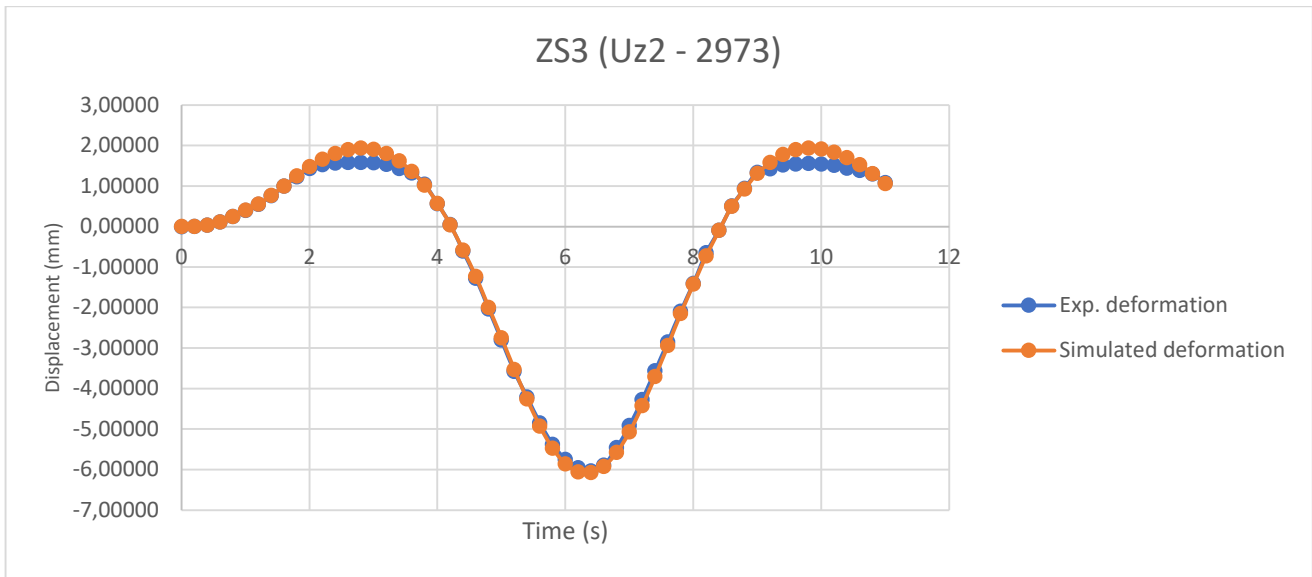


Figura 62. Gráfico deformación vs tiempo para el caso ZS4, nodo 2972

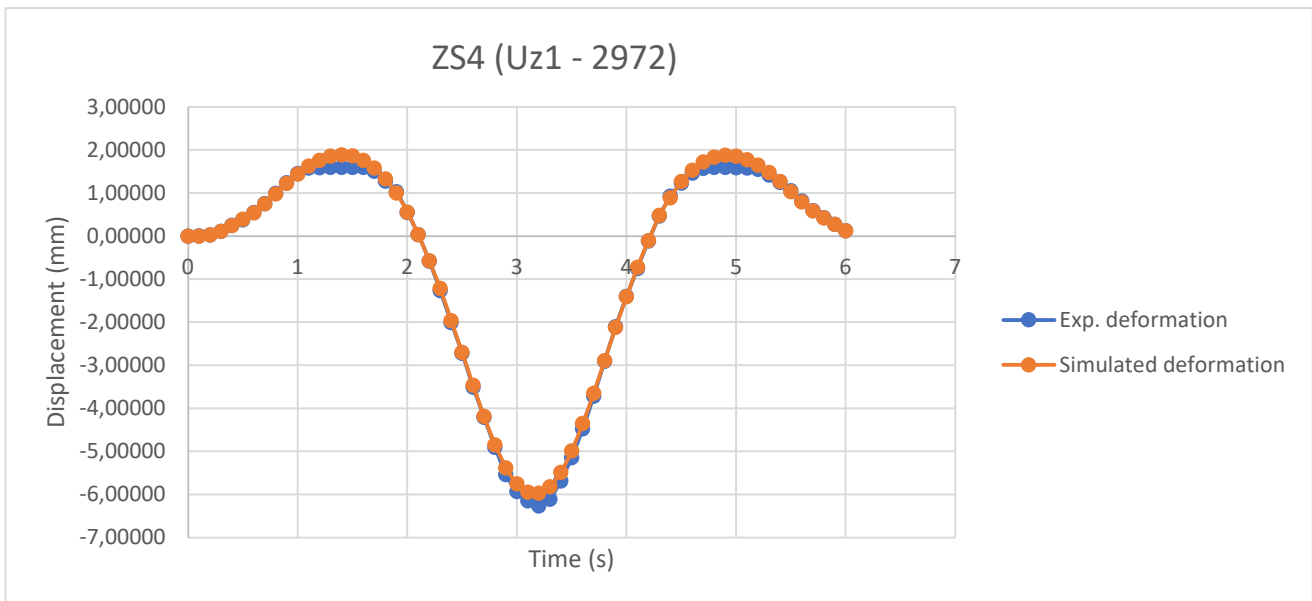
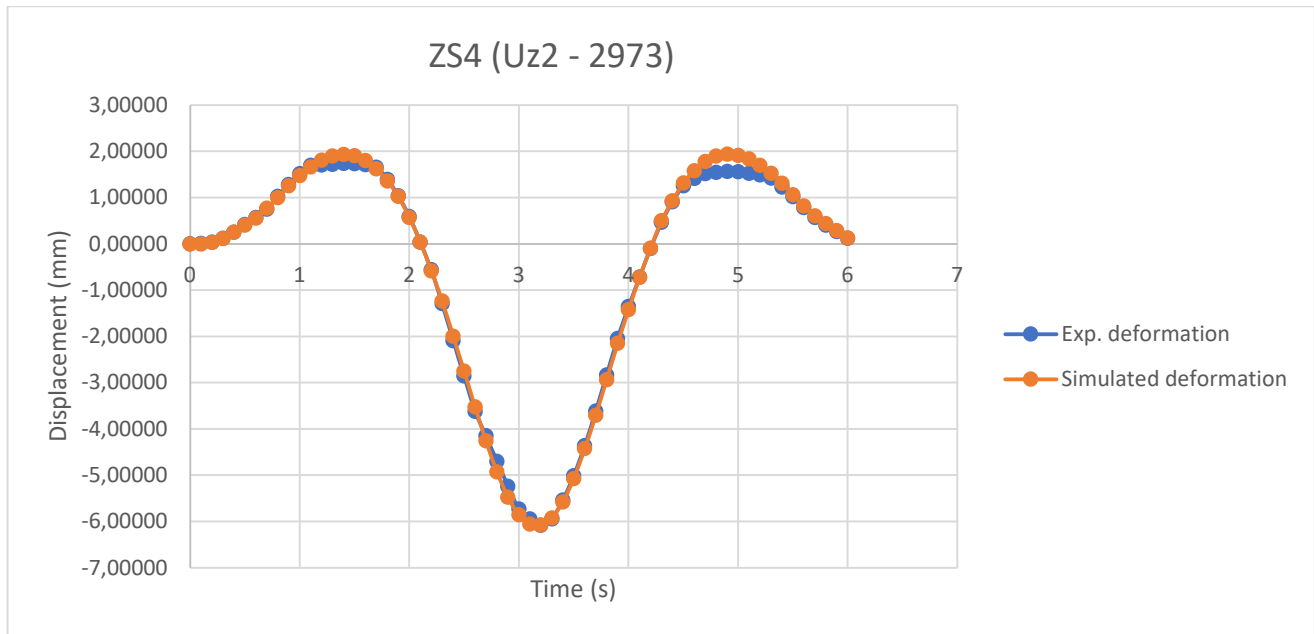


Figura 63. Gráfico deformación vs tiempo para el caso ZS4, nodo 2973



A continuación, se presentan las tablas que contienen los datos utilizados para generar estos gráficos. En las tablas se muestran los valores experimentales medidos, los valores simulados, el error absoluto y el error relativo para cada caso de carga.

Tabla 1. Deformación para el caso ZS1, nodos 2972 y 2973 (tiempo 0 – 36 s).

Tiempo	Deformación experimental uz1 (mm)	Deformación simulada uz1 (mm)	Error absoluto uz1 (mm)	Error relativo uz1 (%)	Deformación experimental uz2 (mm)	Deformación simulada uz2 (mm)	Error absoluto uz2 (mm)	Error relativo uz2 (%)
0	0.00295	0	0.0029547	100.00	-0.00269	0	0.00269	100.00
1.5	0.00988	0	0.0098771	100.00	0.00709	0	0.007087	100.00
3	0.04347	0.042196	0.0012748	2.93	0.04280	0.043241	0.000443	1.04
4.5	0.13093	0.126202	0.0047266	3.61	0.12505	0.129142	0.004095	3.27
6	0.30271	0.288496	0.0142146	4.70	0.28546	0.295156	0.009696	3.40
7.5	0.46042	0.446574	0.0138416	3.01	0.43332	0.456763	0.023447	5.41
9	0.62434	0.636356	0.0120155	1.92	0.61543	0.650951	0.035518	5.77
10.5	0.82350	0.850682	0.0271798	3.30	0.81574	0.870222	0.054479	6.68
12	1.09058	1.125871	0.0352913	3.24	1.07743	1.151835	0.074408	6.91
13.5	1.32105	1.372225	0.0511783	3.87	1.31413	1.403893	0.089764	6.83
15	1.50969	1.579515	0.0698226	4.62	1.48008	1.616074	0.135991	9.19
16.5	1.55046	1.740294	0.1898344	12.24	1.51781	1.780751	0.262945	17.32
18	1.58900	1.847094	0.2580894	16.24	1.55455	1.890216	0.335661	21.59
19.5	1.60089	1.890755	0.2898699	18.11	1.56827	1.93507	0.366799	23.39
21	1.58130	1.861771	0.2804758	17.74	1.56411	1.90553	0.341417	21.83
22.5	1.55223	1.750097	0.1978681	12.75	1.52832	1.791376	0.263059	17.21
24	1.51831	1.549808	0.0315	2.07	1.49293	1.586606	0.093672	6.27
25.5	1.29944	1.260295	0.0391466	3.01	1.28518	1.290603	0.00542	0.42
27	0.91051	0.868278	0.0422334	4.64	0.90392	0.88947	0.014446	1.60
28.5	0.40798	0.396993	0.0109913	2.69	0.42254	0.407251	0.015286	3.62
30	-0.24112	-0.231774	0.0093467	3.88	-0.22624	-0.232695	0.006459	2.86
31.5	-0.93925	-0.912648	0.0266038	2.83	-0.89201	-0.926538	0.03453	3.87
33	-1.69525	-1.663153	0.0320932	1.89	-1.62763	-1.692184	0.064557	3.97
34.5	-2.47448	-2.431307	0.0431695	1.74	-2.38347	-2.476421	0.092956	3.90
36	-3.18356	-3.269062	0.0854979	2.69	-3.15833	-3.328917	0.170584	5.40

Tabla 2. Deformación para el caso ZS1, nodos 2972 y 2973 (tiempo 37.5 s – 79.5s)

Tiempo	Deformación experimental uz1 (mm)	Deformación simulada uz1 (mm)	Error absoluto uz1 (mm)	Error relativo uz1 (%)	Deformación experimental uz2 (mm)	Deformación simulada uz2 (mm)	Error absoluto uz2 (mm)	Error relativo uz2 (%)
37.5	-4.15937	-4.05321	0.106158	2.55	-4.00914	-4.127404	0.118259	2.95
39	-4.97506	-4.769846	0.2052168	4.12	-4.77834	-4.85699	0.078649	1.65
40.5	-5.59788	-5.35781	0.2400674	4.29	-5.36925	-5.455702	0.086455	1.61
42	-6.07399	-5.761399	0.3125937	5.15	-5.83851	-5.867007	0.028499	0.49
43.5	-6.20567	-5.95428	0.251386	4.05	-5.95768	-6.064272	0.106596	1.79
45	-6.12854	-5.951722	0.1768179	2.89	-5.87317	-6.060219	0.187052	3.18
46.5	-5.86712	-5.75024	0.1168784	1.99	-5.63386	-5.853653	0.219796	3.90
48	-5.46179	-5.341469	0.1203225	2.20	-5.24465	-5.434445	0.189797	3.62
49.5	-4.90816	-4.746116	0.1620475	3.30	-4.71292	-4.829266	0.116351	2.47
51	-4.16539	-4.027834	0.1375556	3.30	-3.99352	-4.09714	0.103624	2.59
52.5	-3.21882	-3.240948	0.0221298	0.69	-3.14570	-3.296022	0.150326	4.78
54	-2.37034	-2.421807	0.0514711	2.17	-2.32327	-2.460007	0.136738	5.89
55.5	-1.58558	-1.635045	0.049462	3.12	-1.55965	-1.656661	0.097012	6.22
57	-0.84321	-0.870729	0.0275154	3.26	-0.82154	-0.876519	0.054975	6.69
58.5	-0.21381	-0.205079	0.0087318	4.08	-0.19350	-0.1977	0.004201	2.17
60	0.38313	0.400833	0.0176989	4.62	0.38362	0.41969	0.036072	9.40
61.5	0.95184	0.884987	0.0668534	7.02	0.94662	0.916695	0.029923	3.16
63	1.22918	1.286785	0.0576002	4.69	1.22785	1.32918	0.101333	8.25
64.5	1.39717	1.558462	0.1612951	11.54	1.41014	1.60793	0.19779	14.03
66	1.45849	1.752537	0.2940438	20.16	1.46951	1.806508	0.336997	22.93
67.5	1.46724	1.85766	0.3904164	26.61	1.48021	1.913992	0.433785	29.31
69	1.47786	1.881566	0.4037087	27.32	1.49193	1.9381	0.446171	29.91
70.5	1.47652	1.834109	0.3575868	24.22	1.48270	1.888826	0.406122	27.39
72	1.43287	1.724672	0.2918044	20.37	1.45154	1.775796	0.324254	22.34
73.5	1.37247	1.562444	0.1899742	13.84	1.39831	1.608481	0.210173	15.03
75	1.28016	1.354474	0.0743176	5.81	1.29675	1.394269	0.097519	7.52
76.5	1.11299	1.108141	0.0048458	0.44	1.12204	1.140737	0.018697	1.67
78	0.84837	0.836988	0.0113836	1.34	0.85235	0.861496	0.009144	1.07
79.5	0.62966	0.623375	0.0062805	1.00	0.63857	0.641677	0.003107	0.49

Tabla 3. Deformación para el caso ZS3, nodos 2972 y 2973 (tiempo 0 s – 6s)

Tiempo	Deformación experimental uz1 (mm)	Deformación simulada uz1 (mm)	Error absoluto uz1 (mm)	Error relativo uz1 (%)	Deformación experimental uz2 (mm)	Deformación simulada uz2 (mm)	Error absoluto uz2 (mm)	Error relativo uz2 (%)
0	0.00031	0	0.000315	100.00	-0.00306	0	0.003062	100.00
0.2	0.00727	0	0.007267	100.00	0.00505	0	0.005053	100.00
0.4	0.03130	0.030845	0.000454	1.45	0.03099	0.03162	0.000627	2.02
0.6	0.11348	0.109271	0.004211	3.71	0.11069	0.111839	0.001146	1.04
0.8	0.24600	0.244316	0.001683	0.68	0.24665	0.249986	0.003338	1.35
1	0.39798	0.394254	0.003729	0.94	0.39626	0.403274	0.007017	1.77
1.2	0.53573	0.544753	0.009023	1.68	0.54469	0.55721	0.012521	2.30
1.4	0.77436	0.751499	0.022863	2.95	0.76123	0.768757	0.007524	0.99
1.6	1.01339	0.979533	0.033857	3.34	0.99609	1.002107	0.006021	0.60
1.8	1.21443	1.226408	0.011978	0.99	1.23077	1.254695	0.023925	1.94
2	1.42611	1.444005	0.017897	1.25	1.43658	1.477352	0.040772	2.84
2.2	1.52113	1.625423	0.104298	6.86	1.53150	1.663085	0.13158	8.59
2.4	1.57593	1.764763	0.188832	11.98	1.56629	1.805823	0.239533	15.29
2.6	1.58884	1.855906	0.267071	16.81	1.57976	1.899253	0.319491	20.22
2.8	1.59363	1.891188	0.297563	18.67	1.58634	1.935524	0.349186	22.01
3	1.57262	1.862723	0.290101	18.45	1.57195	1.906504	0.33455	21.28
3.2	1.52937	1.762528	0.233161	15.25	1.53665	1.804081	0.267433	17.40
3.4	1.40839	1.58556	0.177169	12.58	1.43072	1.623163	0.192447	13.45
3.6	1.25914	1.330045	0.070902	5.63	1.32263	1.361907	0.039275	2.97
3.8	1.01801	1.001493	0.016515	1.62	1.04738	1.025182	0.022203	2.12
4	0.55332	0.558822	0.005502	0.99	0.56490	0.573764	0.008859	1.57
4.2	0.03159	0.035746	0.004153	13.15	0.05382	0.039817	0.014	26.01
4.4	-0.60036	-0.573647	0.026714	4.45	-0.60905	-0.580991	0.02806	4.61
4.6	-1.24701	-1.21161	0.035396	2.84	-1.27483	-1.232808	0.042023	3.30
4.8	-1.92020	-1.961615	0.041419	2.16	-2.03705	-1.9963	0.040751	2.00
5	-2.62900	-2.696922	0.067918	2.58	-2.80469	-2.74653	0.058156	2.07
5.2	-3.59856	-3.463044	0.135519	3.77	-3.57559	-3.526417	0.049176	1.38
5.4	-4.38728	-4.183292	0.203986	4.65	-4.21209	-4.259883	0.047792	1.13
5.6	-5.00449	-4.840869	0.163618	3.27	-4.84739	-4.929265	0.081872	1.69
5.8	-5.52329	-5.376606	0.146688	2.66	-5.37456	-5.474865	0.100307	1.87
6	-5.91528	-5.752273	0.163007	2.76	-5.74634	-5.85771	0.11137	1.94

Tabla 4. Deformación para el caso ZS3, nodos 2972 y 2973 (tiempo 6.2 s – 11 s)

Tiempo	Deformación experimental uz1 (mm)	Deformación simulada uz1 (mm)	Error absoluto uz1 (mm)	Error relativo uz1 (%)	Deformación experimental uz2 (mm)	Deformación simulada uz2 (mm)	Error absoluto uz2 (mm)	Error relativo uz2 (%)
6.2	-6.16006	-5.944928	0.215135	3.49	-5.95455	-6.054641	0.100089	1.68
6.4	-6.24607	-5.964246	0.28182	4.51	-6.03402	-6.07381	0.039787	0.66
6.6	-6.11722	-5.817971	0.299253	4.89	-5.89462	-5.922496	0.027877	0.47
6.8	-5.68695	-5.481796	0.205155	3.61	-5.45826	-5.578101	0.119843	2.20
7	-5.13662	-4.984962	0.151659	2.95	-4.91387	-5.071895	0.158029	3.22
7.2	-4.48186	-4.348345	0.133512	2.98	-4.27590	-4.424833	0.148933	3.48
7.4	-3.74352	-3.643186	0.10033	2.68	-3.56253	-3.704636	0.142111	3.99
7.6	-2.96372	-2.890648	0.07307	2.47	-2.84618	-2.938738	0.09256	3.25
7.8	-2.14624	-2.118188	0.028053	1.31	-2.09315	-2.149658	0.056512	2.70
8	-1.43094	-1.404274	0.026667	1.86	-1.40157	-1.421904	0.020334	1.45
8.2	-0.71343	-0.720933	0.0075	1.05	-0.64668	-0.72317	0.076495	11.83
8.4	-0.11484	-0.102872	0.011969	10.42	-0.08963	-0.093606	0.003971	4.43
8.6	0.48497	0.482302	0.00267	0.55	0.50904	0.502589	0.006446	1.27
8.8	0.87695	0.895716	0.018766	2.14	0.94169	0.92765	0.014043	1.49
9	1.24981	1.274858	0.025052	2.00	1.34140	1.316779	0.02462	1.84
9.2	1.35381	1.531186	0.177375	13.10	1.42469	1.580036	0.155345	10.90
9.4	1.44555	1.724461	0.278911	19.29	1.52191	1.777779	0.255866	16.81
9.6	1.46701	1.839672	0.372666	25.40	1.54462	1.895607	0.35099	22.72
9.8	1.47884	1.882092	0.403256	27.27	1.55699	1.938808	0.381821	24.52
10	1.46753	1.859961	0.392427	26.74	1.54478	1.915587	0.370806	24.00
10.2	1.43609	1.780826	0.344739	24.01	1.51136	1.833753	0.322396	21.33
10.4	1.36921	1.652405	0.283198	20.68	1.44098	1.701228	0.260252	18.06
10.6	1.31457	1.481117	0.166545	12.67	1.38395	1.524684	0.140738	10.17
10.8	1.23065	1.272669	0.042019	3.41	1.29688	1.310059	0.013183	1.02
11	1.05379	1.033427	0.020361	1.93	1.08901	1.06384	0.025171	2.31

Tabla 5. Deformación para el caso ZS4, nodos 2972 y 2973 (tiempo 0 s – 3 s)

Tiempo	Deformación experimental uz1 (mm)	Deformación simulada uz1 (mm)	Error absoluto uz1 (mm)	Error relativo uz1 (%)	Deformación experimental uz2 (mm)	Deformación simulada uz2 (mm)	Error absoluto uz2 (mm)	Error relativo uz2 (%)
0	0.00125	0	0.0012504	100.00	0.00652	0	0.0065236	100.00
0.1	0.00605	0	0.0060469	100.00	0.01166	0	0.0116557	100.00
0.2	0.03296	0.030845	0.0021171	6.42	0.03576	0.03162	0.0041372	11.57
0.3	0.11575	0.109271	0.0064797	5.60	0.11834	0.111839	0.0065059	5.50
0.4	0.25145	0.244316	0.0071323	2.84	0.25548	0.249986	0.005489	2.15
0.5	0.38143	0.394254	0.0128268	3.36	0.41909	0.403274	0.0158133	3.77
0.6	0.55209	0.544753	0.0073369	1.33	0.56733	0.55721	0.0101234	1.78
0.7	0.76167	0.751499	0.0101679	1.33	0.75218	0.768757	0.0165721	2.20
0.8	0.99878	0.979533	0.0192444	1.93	1.03016	1.002107	0.028053	2.72
0.9	1.23972	1.226408	0.0133156	1.07	1.28364	1.254695	0.0289434	2.25
1	1.45910	1.444005	0.0150984	1.03	1.51845	1.477352	0.0411023	2.71
1.1	1.58581	1.625423	0.039609	2.50	1.69500	1.663085	0.0319193	1.88
1.2	1.59204	1.764763	0.1727227	10.85	1.70802	1.805823	0.0978035	5.73
1.3	1.60232	1.855906	0.2535898	15.83	1.71876	1.899253	0.1804917	10.50
1.4	1.60246	1.891188	0.2887252	18.02	1.73765	1.935524	0.1978694	11.39
1.5	1.60098	1.862723	0.2617437	16.35	1.73181	1.906504	0.174691	10.09
1.6	1.59937	1.762528	0.1631624	10.20	1.71522	1.804081	0.0888642	5.18
1.7	1.51158	1.58556	0.0739845	4.89	1.65925	1.623163	0.0360866	2.17
1.8	1.27991	1.330045	0.0501324	3.92	1.39602	1.361907	0.0341161	2.44
1.9	1.03226	1.001493	0.030763	2.98	1.03819	1.025182	0.0130105	1.25
2	0.55165	0.558822	0.0071693	1.30	0.59221	0.573764	0.0184479	3.12
2.1	0.03483	0.035746	0.000912	2.62	0.03815	0.039817	0.0016699	4.38
2.2	-0.58064	-0.573647	0.00699	1.20	-0.55823	-0.580991	0.0227562	4.08
2.3	-1.25858	-1.21161	0.0469703	3.73	-1.29239	-1.232808	0.0595837	4.61
2.4	-2.00301	-1.961615	0.0413952	2.07	-2.09222	-1.9963	0.0959212	4.58
2.5	-2.71545	-2.696922	0.0185245	0.68	-2.85630	-2.74653	0.1097749	3.84
2.6	-3.50727	-3.463044	0.0442226	1.26	-3.61776	-3.526417	0.0913448	2.52
2.7	-4.20252	-4.183292	0.0192257	0.46	-4.14896	-4.259883	0.1109195	2.67
2.8	-4.90115	-4.840869	0.0602789	1.23	-4.70247	-4.929265	0.2267953	4.82
2.9	-5.53655	-5.376606	0.1599443	2.89	-5.23678	-5.474865	0.2380814	4.55
3	-5.93083	-5.752273	0.1785577	3.01	-5.72715	-5.85771	0.1305581	2.28

Tabla 6. Deformación para el caso ZS4, nodos 2972 y 2973 (tiempo 3.1 s – 6s)

Tiempo	Deformación experimental uz1 (mm)	Deformación simulada uz1 (mm)	Error absoluto uz1 (mm)	Error relativo uz1 (%)	Deformación experimental uz2 (mm)	Deformación simulada uz2 (mm)	Error absoluto uz2 (mm)	Error relativo uz2 (%)
3.1	-6.14136	-5.944928	0.1964364	3.20	-5.94343	-6.054641	0.1112076	1.87
3.2	-6.26449	-5.964246	0.30024	4.79	-6.08113	-6.07381	0.0073183	0.12
3.3	-6.10552	-5.817971	0.287552	4.71	-5.94171	-5.922496	0.0192098	0.32
3.4	-5.67990	-5.481796	0.198099	3.49	-5.53600	-5.578101	0.0421032	0.76
3.5	-5.13911	-4.984962	0.1541443	3.00	-5.01169	-5.071895	0.0602088	1.20
3.6	-4.46896	-4.348345	0.1206182	2.70	-4.35762	-4.424833	0.0672159	1.54
3.7	-3.71055	-3.643186	0.0673591	1.82	-3.61532	-3.704636	0.0893157	2.47
3.8	-2.90743	-2.890648	0.0167853	0.58	-2.82890	-2.938738	0.1098389	3.88
3.9	-2.10178	-2.118188	0.0164048	0.78	-2.04075	-2.149658	0.1089112	5.34
4	-1.39874	-1.404274	0.0055355	0.40	-1.35411	-1.421904	0.0677892	5.01
4.1	-0.74750	-0.720933	0.0265657	3.55	-0.71923	-0.72317	0.0039368	0.55
4.2	-0.11129	-0.102872	0.0084155	7.56	-0.10007	-0.093606	0.0064656	6.46
4.3	0.47074	0.482302	0.011557	2.46	0.46564	0.502589	0.0369466	7.93
4.4	0.92796	0.895716	0.0322393	3.47	0.90986	0.92765	0.0177867	1.95
4.5	1.23770	1.274858	0.0371544	3.00	1.25513	1.316779	0.0616506	4.91
4.6	1.46234	1.531186	0.0688443	4.71	1.41541	1.580036	0.1646292	11.63
4.7	1.57876	1.724461	0.1457006	9.23	1.51580	1.777779	0.2619761	17.28
4.8	1.59823	1.839672	0.2414464	15.11	1.54742	1.895607	0.3481875	22.50
4.9	1.60246	1.882092	0.2796292	17.45	1.56478	1.938808	0.3740255	23.90
5	1.59444	1.859961	0.2655248	16.65	1.55633	1.915587	0.359257	23.08
5.1	1.58291	1.780826	0.1979126	12.50	1.52178	1.833753	0.3119733	20.50
5.2	1.55327	1.652405	0.0991308	6.38	1.49113	1.701228	0.2100974	14.09
5.3	1.42257	1.481117	0.0585422	4.12	1.42049	1.524684	0.1041978	7.34
5.4	1.24769	1.272669	0.0249759	2.00	1.22620	1.310059	0.0838593	6.84
5.5	1.05753	1.033427	0.024107	2.28	1.02151	1.06384	0.0423322	4.14
5.6	0.81673	0.793072	0.0236572	2.90	0.78348	0.81631	0.0328269	4.19
5.7	0.59865	0.590993	0.0076576	1.28	0.56885	0.608348	0.0394951	6.94
5.8	0.43254	0.425773	0.0067629	1.56	0.40597	0.438192	0.0322257	7.94
5.9	0.27581	0.278615	0.0028006	1.02	0.26535	0.286908	0.0215545	8.12
6	0.12475	0.126878	0.0021259	1.70	0.12284	0.130684	0.0078403	6.38

Tabla 7. Análisis estadístico del error absoluto y la desviación estándar en los casos de validación.

Caso de validación	Media del error absoluto (mm)		Desv. estándar (mm)	
	Uz1 - 2972	Uz2 - 2973	Uz1 - 2972	Uz2 - 2973
ZS1	0.11287519	0.12657084	0.1162136	0.1259083
ZS3	0.12169493	0.10530867	0.1211857	0.1164501
ZS4	0.08110761	0.08754110	0.0944772	0.0955337

3.3 Daños simulados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones de diversos escenarios de daños en la estructura. Para cada escenario, se compararon los esfuerzos en diferentes elementos de la estructura, según el caso específico.

3.3.1 Fatiga

En las figuras 64 y 65 se presentan gráficos que muestran la relación entre la deformación y el tiempo en los nodos donde se situaban los sensores utilizados en las pruebas de carga, se compara su deformación para los escenarios con y sin agrietamiento en la estructura. Se simuló el tránsito de la locomotora a 70 km/h.

Figura 64. Gráfico deformación vs tiempo del nodo 2972, con y sin daños para el caso ZS4

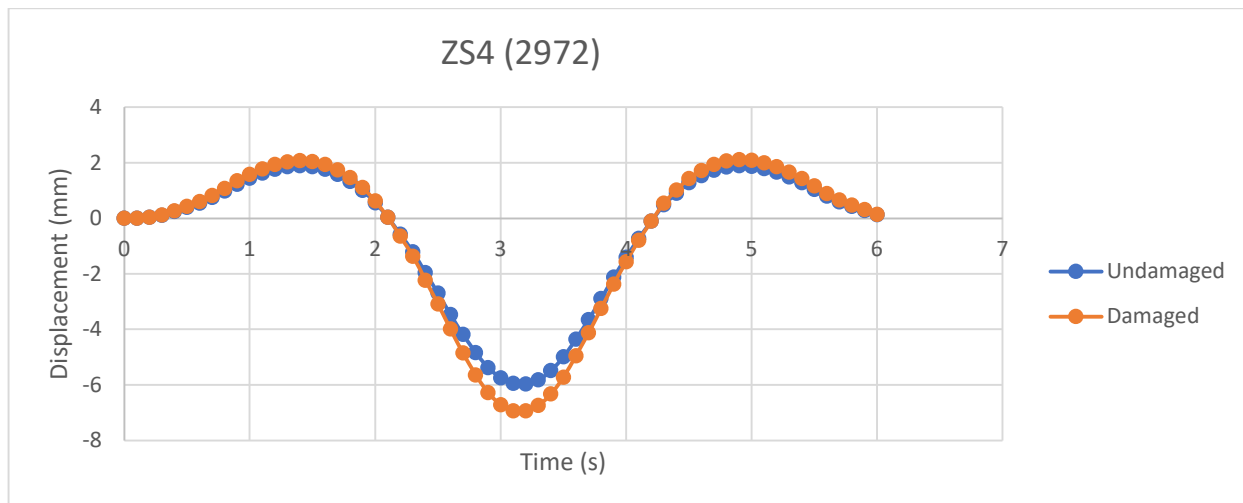
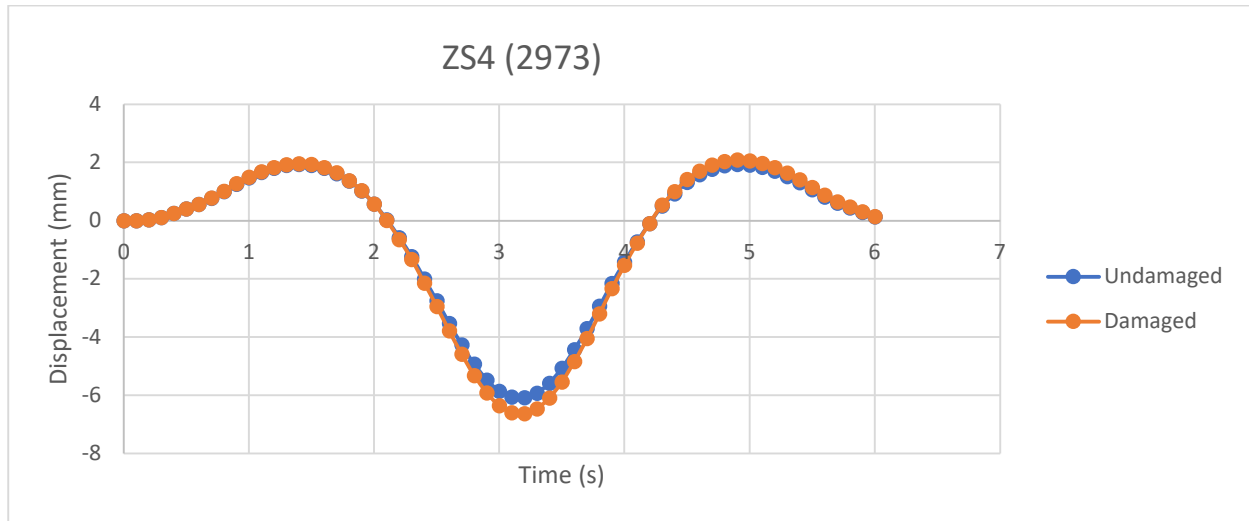


Figura 65. Gráfico deformación vs tiempo del nodo 2973, con y sin daños para el caso ZS4



A continuación, se presentan las tablas de deformación correspondientes a la carga ZS4, comparando los valores obtenidos en los escenarios con y sin daños.

Tabla 8. Diferencia de deformación para los nodos 2972 y 2973 con y sin daños de fatiga simulados. (tiempo 0 – 3s)

Tiempo	Def. sin daños nodo 2972 (mm)	Def. con daños nodo 2972 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)	Def. sin daños nodo 2973 (mm)	Def. con daños nodo 2973 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)
0	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
0.1	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
0.2	0.030838	0.033789	0.002951	9.57	0.031621	0.032058	0.000437	1.38
0.3	0.109245	0.119712	0.010467	9.58	0.111844	0.113395	0.001551	1.39
0.4	0.244256	0.267663	0.023407	9.58	0.249997	0.253467	0.00347	1.39
0.5	0.394157	0.431943	0.037786	9.59	0.403293	0.408894	0.005601	1.39
0.6	0.544619	0.596842	0.052223	9.59	0.557236	0.564977	0.007741	1.39
0.7	0.751314	0.823378	0.072064	9.59	0.768793	0.779473	0.01068	1.39
0.8	0.979292	1.073245	0.093953	9.59	1.002154	1.016078	0.013924	1.39
0.9	1.226106	1.343777	0.117671	9.60	1.254754	1.272193	0.017439	1.39
1	1.443649	1.582253	0.138604	9.60	1.477422	1.497965	0.020543	1.39
1.1	1.625023	1.781116	0.156093	9.61	1.663164	1.686306	0.023142	1.39
1.2	1.764328	1.933901	0.169573	9.61	1.805909	1.831064	0.025155	1.39
1.3	1.85545	2.03392	0.17847	9.62	1.899343	1.925832	0.026489	1.39
1.4	1.890723	2.072792	0.182069	9.63	1.935616	1.962635	0.027019	1.40
1.5	1.862266	2.041908	0.179642	9.65	1.906594	1.933208	0.026614	1.40
1.6	1.762097	1.932541	0.170444	9.67	1.804166	1.829344	0.025178	1.40
1.7	1.585174	1.739418	0.154244	9.73	1.62324	1.645762	0.022522	1.39
1.8	1.329723	1.460008	0.130285	9.80	1.361972	1.381578	0.019606	1.44
1.9	1.00126	1.105498	0.104238	10.41	1.02523	1.039032	0.013802	1.35
2	0.558704	0.618348	0.059644	10.68	0.573792	0.570129	0.003663	0.64
2.1	0.035766	0.038898	0.003132	8.76	0.039822	0.010454	0.029368	73.75
2.2	-0.573472	-0.646759	0.073287	12.78	-0.581013	-0.642489	0.061476	10.58
2.3	-1.211285	-1.36907	0.157785	13.03	-1.23286	-1.325747	0.092887	7.53
2.4	-1.961144	-2.230467	0.269323	13.73	-1.996382	-2.137389	0.141007	7.06
2.5	-2.696336	-3.08382	0.387484	14.37	-2.746644	-2.940587	0.193943	7.06
2.6	-3.462382	-3.991325	0.528943	15.28	-3.526567	-3.78595	0.259383	7.36
2.7	-4.182627	-4.85148	0.668853	15.99	-4.260078	-4.583356	0.323278	7.59
2.8	-4.840302	-5.643465	0.803163	16.59	-4.929502	-5.315751	0.386249	7.84
2.9	-5.376274	-6.278163	0.901889	16.78	-5.475127	-5.918844	0.443717	8.10
3	-5.752303	-6.719271	0.966968	16.81	-5.858015	-6.358498	0.500483	8.54

Tabla 9. Diferencia de deformación para los nodos 2972 y 2973 con y sin daños de fatiga simulados (tiempo 3.1 s – 6s)

Tiempo	Deformación experimental uz1 (mm)	Deformación simulada uz1 (mm)	Error absoluto uz1 (mm)	Error relativo uz1 (%)	Deformación experimental uz2 (mm)	Deformación simulada uz2 (mm)	Error absoluto uz2 (mm)	Error relativo uz2 (%)
3.1	-5.945337	-6.930644	0.985307	16.57	-6.055176	-6.598217	0.543041	8.97
3.2	-5.964948	-6.933505	0.968557	16.24	-6.074916	-6.629933	0.555017	9.14
3.3	-5.81932	-6.745831	0.926511	15.92	-5.924019	-6.465568	0.541549	9.14
3.4	-5.484871	-6.326189	0.841318	15.34	-5.579052	-6.085129	0.506077	9.07
3.5	-4.990091	-5.721697	0.731606	14.66	-5.071755	-5.541748	0.469993	9.27
3.6	-4.35399	-4.950661	0.596671	13.70	-4.424644	-4.836315	0.411671	9.30
3.7	-3.64853	-4.118824	0.470294	12.89	-3.704738	-4.046392	0.341654	9.22
3.8	-2.895083	-3.247857	0.352774	12.19	-2.939367	-3.196438	0.257071	8.75
3.9	-2.122852	-2.369539	0.246687	11.62	-2.149469	-2.32544	0.175971	8.19
4	-1.408606	-1.564625	0.156019	11.08	-1.421032	-1.529147	0.108115	7.61
4.1	-0.724079	-0.797797	0.073718	10.18	-0.721898	-0.770493	0.048595	6.73
4.2	-0.103311	-0.105416	0.002105	2.04	-0.093123	-0.094389	0.001266	1.36
4.3	0.484202	0.547923	0.063721	13.16	0.50268	0.544519	0.041839	8.32
4.4	0.899179	1.009579	0.1104	12.28	0.927606	1.000443	0.072837	7.85
4.5	1.279722	1.433471	0.153749	12.01	1.31666	1.418248	0.101588	7.72
4.6	1.537004	1.720821	0.183817	11.96	1.57989	1.701319	0.121429	7.69
4.7	1.730994	1.937474	0.20648	11.93	1.777613	1.91395	0.136337	7.67
4.8	1.84663	2.066541	0.219911	11.91	1.895429	2.040603	0.145174	7.66
4.9	1.889203	2.11393	0.224727	11.90	1.938625	2.086965	0.14834	7.65
5	1.866983	2.088886	0.221903	11.89	1.915405	2.061867	0.146462	7.65
5.1	1.787546	1.999877	0.212331	11.88	1.833578	1.973711	0.140133	7.64
5.2	1.658637	1.855562	0.196925	11.87	1.701065	1.83102	0.129955	7.64
5.3	1.486702	1.663149	0.176447	11.87	1.524537	1.640971	0.116434	7.64
5.4	1.277466	1.429039	0.151573	11.87	1.309932	1.409952	0.10002	7.64
5.5	1.037322	1.160376	0.123054	11.86	1.063737	1.144943	0.081206	7.63
5.6	0.796061	0.890479	0.094418	11.86	0.816231	0.878535	0.062304	7.63
5.7	0.59322	0.663568	0.070348	11.86	0.608289	0.654713	0.046424	7.63
5.8	0.427377	0.478052	0.050675	11.86	0.438149	0.471585	0.033436	7.63
5.9	0.279665	0.312823	0.033158	11.86	0.286881	0.30877	0.021889	7.63
6	0.127357	0.142456	0.015099	11.86	0.130672	0.140641	0.009969	7.63

De manera similar, al comparar los esfuerzos producidos por la carga permanente en los nodos 2972 y 2973 debido a las grietas presentes en la estructura, se ha elaborado la Tabla 10

Tabla 10. Diferencia de esfuerzo para los nodos 2972 y 2973 con y sin daños de fatiga simulados.

Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
2972	32.604	1.494	36.678	75.623	4.074	12.50	74.129	227.36
2973	30.777	9.202	31.775	9.494	0.998	3.24	0.292	0.95

Se presentan gráficos que ilustran la representación de cada una de las grietas simuladas, junto con tablas que detallan la variación de esfuerzos en los elementos afectados por fatiga. Para clarificar la terminología utilizada en este trabajo respecto a la numeración de los nodos, se define la convención empleada de la siguiente manera:

1. **Nodo 1:** Punto superior derecho
2. **Nodo 2:** Punto superior izquierdo
3. **Nodo 3:** Punto inferior izquierdo
4. **Nodo 4:** Punto inferior derecho

Figura 66. Nomenclatura usada para los nodos

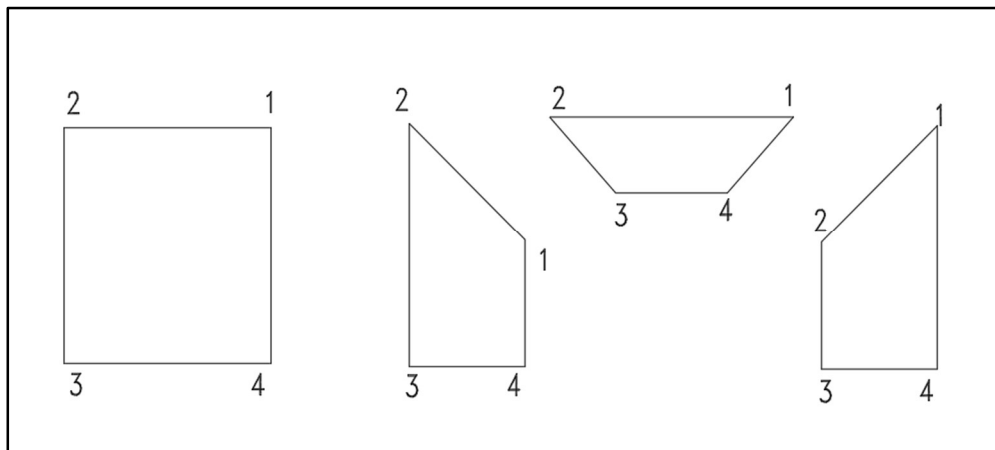
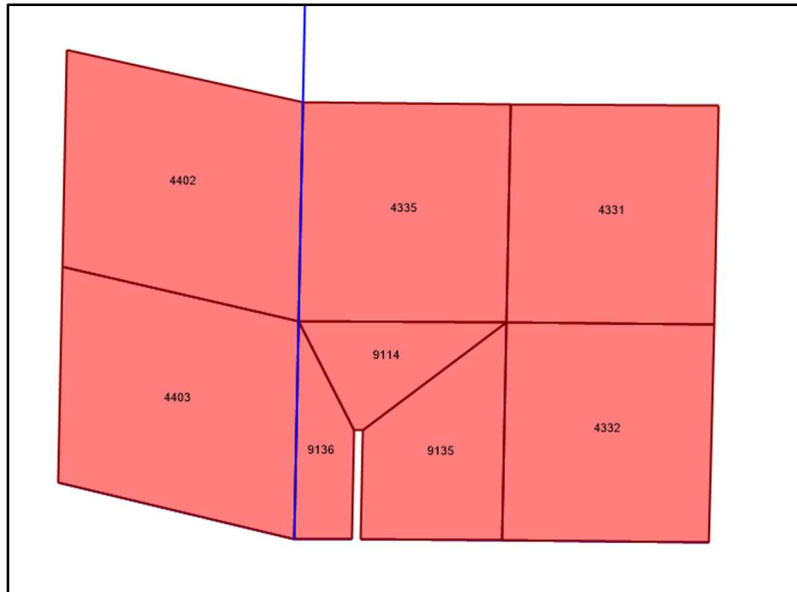


Figura 67. Representación grieta 1, viga izquierda.



Las tablas 11, 15, 19, 23, 27 y 31 presentan la diferencia de esfuerzos máximos y mínimos en las zonas directamente influenciadas por las grietas, mostrando la variación de esfuerzos debido a la carga permanente. Por otro lado, las tablas 13, 17, 21, 25, 29 y 33 detallan la variación de esfuerzos en las áreas adyacentes a las zonas directamente afectadas, también bajo la influencia de la carga permanente.

Tabla 11. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en el área con la grieta 1, viga izquierda.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
9114	1	8.229	-57.38	79.012	-58.53	70.783	860.2	1.15	2.0
	2	24.307	-45.903	-15.389	-118.295	39.696	163.3	72.392	157.7
	3	8.833	-42.998	-333.617	-798.102	342.45	3876.9	755.104	1756.1
	4	10.494	-50.846	-295.144	-1026.44	305.638	2912.5	975.597	1918.7
9135	1	11.723	-61.667	5.724	-267.628	5.999	51.2	205.961	334.0
	2	18.728	-52.689	-109.839	-504.992	128.567	686.5	452.303	858.4
	3	17.96	-39.522	57.357	-165.034	39.397	219.4	125.512	317.6
	4	10.151	-43.465	97.698	-18.455	87.547	862.4	25.01	57.5
9136	1	43.719	-29.251	-131.868	-411.803	175.587	401.6	382.552	1307.8
	2	4.243	-67.513	-78.075	-319.116	82.318	1940.1	251.603	372.7
	3	4.018	-47.368	6.934	-64.421	2.916	72.6	17.053	36.0
	4	13.874	-51.087	9.881	-76.49	3.993	28.8	25.403	49.7

De manera similar, las tablas 12, 16, 20, 24, 28 y 32 presentan la diferencia de esfuerzos en los planos X y Y en las zonas directamente influenciadas por las grietas, mostrando la variación de esfuerzos debido a la combinación de carga permanente + carga de viento. Por otro lado, las tablas 14, 18, 22, 26, 30 y 34 detallan la variación de esfuerzos en las áreas adyacentes a las zonas directamente afectadas, también bajo la influencia de esta combinación de cargas.

Tabla 12. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + carga de viento, en el área con la grieta 1, viga izquierda.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
9114	1	-45.123	-4.027	5.848	10.388	50.971	113.0	14.415	358.0
	2	-39.143	17.547	-27.22	-102.422	11.923	30.5	119.969	683.7
	3	-39.3	5.135	-741.313	-352.278	702.013	1786.3	357.413	6960.3
	4	-40.705	0.353	-777.055	-473.274	736.35	1809.0	473.627	134172.0
9135	1	-47.825	-2.119	-250.85	-10.694	203.025	424.5	8.575	404.7
	2	-43.098	9.137	-418.714	-194.383	375.616	871.5	203.52	2227.4
	3	-33.652	12.091	-29.721	-78.345	3.931	11.7	90.436	748.0
	4	-35.227	1.912	8.225	66.314	43.452	123.3	64.402	3368.3
9136	1	-6.349	20.817	-398.712	-151.847	392.363	6179.9	172.664	829.4
	2	-61.699	-1.572	-322.475	-79.323	260.776	422.7	77.751	4946.0
	3	-46.32	2.97	-49.622	1.184	3.302	7.1	1.786	60.1
	4	-46.078	8.865	-30.263	-41.883	15.815	34.3	50.748	572.5

Tabla 13. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en las áreas del alma adyacentes a la grieta 1, viga izquierda.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4331	1	7.293	-57.974	16.558	-57.94	9.265	127.0	0.034	0.1
	2	15.482	-51.303	-33.398	-67.983	48.88	315.7	16.68	32.5
	3	12.123	-58.239	-60.105	-162.41	72.228	595.8	104.169	178.9
	4	3.662	-64.672	-10.642	-151.91	14.304	390.6	87.239	134.9
4332	1	17.648	-63.128	8.506	-171.09	9.142	51.8	107.961	171.0
	2	18.47	-58.478	38.161	-175.28	19.691	106.6	116.804	199.7
	3	7.116	-52.025	101.49	-62.485	94.374	1326.2	10.46	20.1
	4	5.442	-55.851	70.451	-57.056	65.009	1194.6	1.205	2.2
4335	1	14.728	-54.621	-33.226	-72.727	47.954	325.6	18.106	33.1
	2	9.508	-44.288	-13.001	-88.14	22.509	236.7	43.852	99.0
	3	7.816	-49.52	-23.311	-98.753	31.127	398.2	49.233	99.4
	4	12.779	-59.627	-39.461	-87.25	52.24	408.8	27.623	46.3
4402	1	5.842	-39.972	-6.299	-93.241	12.141	207.8	53.269	133.3
	2	6.068	-40.774	29.441	-71.95	23.373	385.2	31.176	76.5
	3	2.928	-43.737	2.156	-130.86	0.772	26.4	87.124	199.2
	4	3.143	-43.49	-42.567	-142.79	45.71	1454.3	99.304	228.3
4403	1	8.554	-41.839	-32.596	-165.3	41.15	481.1	123.458	295.1
	2	1.468	-43.962	10.862	-141.7	9.394	639.9	97.733	222.3
	3	0.21	-41.493	55.103	-23.637	54.893	26139.5	17.856	43.0
	4	7.462	-39.563	23.448	-59.367	15.986	214.2	19.804	50.1

Tabla 14. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + carga de viento, en las áreas del alma adyacentes a la grieta 1, viga izquierda.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4331	1	-38.583	-12.099	-53.353	10.919	14.77	38.28	23.018	190.25
	2	-35.267	-0.554	-65.343	-30.738	30.076	85.28	30.184	5448.38
	3	-43.145	-2.971	-160.288	-59.569	117.143	271.51	56.598	1905.02
	4	-46.52	-14.49	-148.226	-17.944	101.706	218.63	3.454	23.84
4332	1	-42.96	-2.519	-147.28	-15.282	104.32	242.83	12.763	506.67
	2	-41.711	1.703	-141.701	2.885	99.99	239.72	1.182	69.41
	3	-45.452	0.543	-7.158	41.482	38.294	84.25	40.939	7539.41
	4	-46.76	-3.649	-12.879	23.6	33.881	72.46	27.249	746.75
4335	1	-38.381	-1.513	-71.215	-32.57	32.834	85.55	31.057	2052.68
	2	-37.311	2.531	-68.202	-28.649	30.891	82.79	31.18	1231.92
	3	-42.599	0.896	-83.896	-33.749	41.297	96.94	34.645	3866.63
	4	-43.728	-3.121	-87.202	-37.573	43.474	99.42	34.452	1103.88
4402	1	-36.802	2.672	-69.075	-29.108	32.273	87.69	31.78	1189.37
	2	-35.288	0.581	-60.977	20.705	25.689	72.80	20.124	3463.68
	3	-39.979	-0.83	-124.615	1.517	84.636	211.70	2.347	282.77
	4	-41.569	1.222	-132.353	-48.303	90.784	218.39	49.525	4052.78
4403	1	-39.463	6.178	-156.528	-35.446	117.065	296.64	41.624	673.75
	2	-41.222	-1.272	-137.922	10.222	96.7	234.58	11.494	903.62
	3	-40.289	-0.994	-16.634	46.405	23.655	58.71	47.399	4768.51
	4	-38.537	6.436	-35.542	0.759	2.995	7.77	5.677	88.21

Posteriormente se muestran en las siguientes figuras una representación gráfica de la variación de esfuerzos en el área con agrietamiento, además se incluye una escala de colores con unidades en megapascales (MPa) para identificar los valores de esfuerzos medidos para cada escenario correspondiente.

Figura 68. Esfuerzo máximo ocasionado por la carga permanente debido a la grieta 1, viga izquierda.

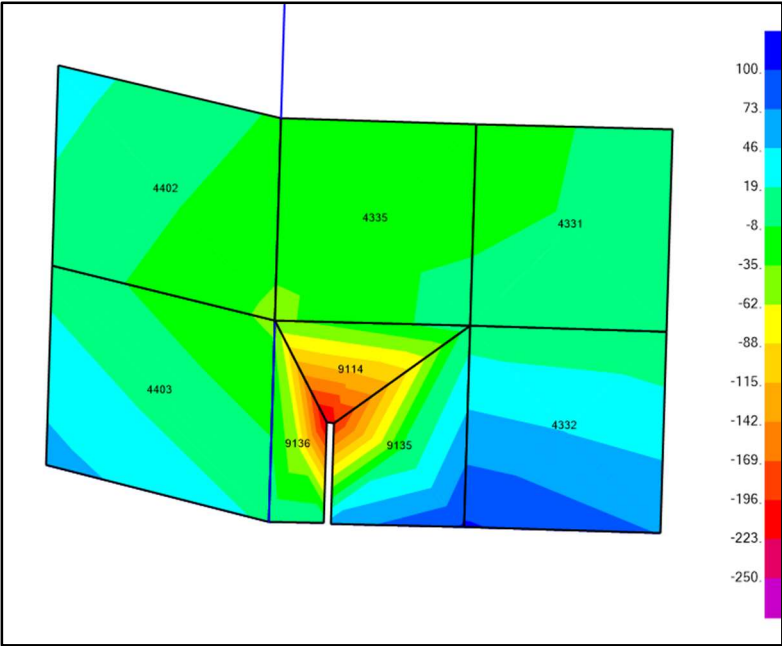


Figura 69. Esfuerzo mínimo ocasionado por la carga permanente debido a la grieta 1, viga izquierda.

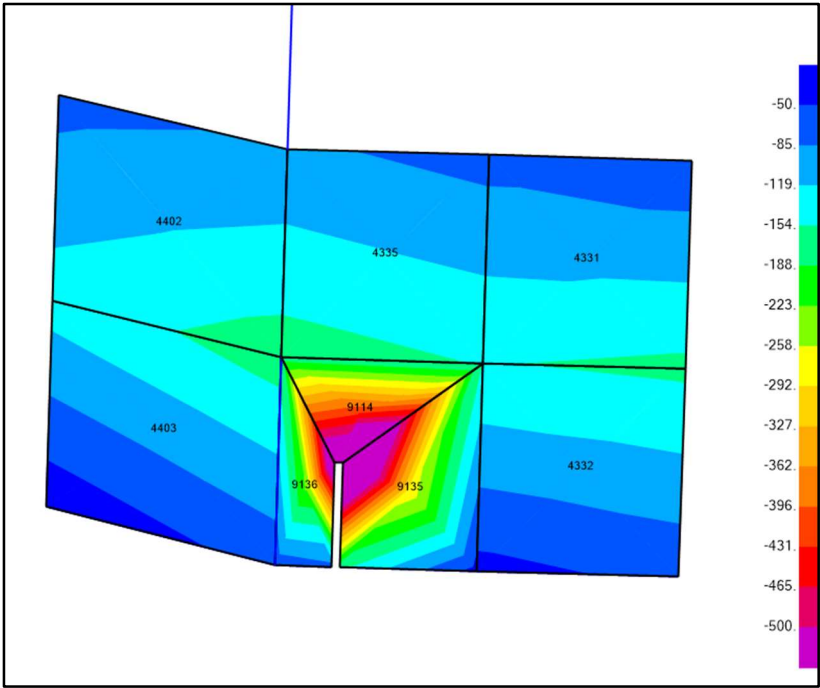


Figura 70. Representación grieta 2, viga izquierda.

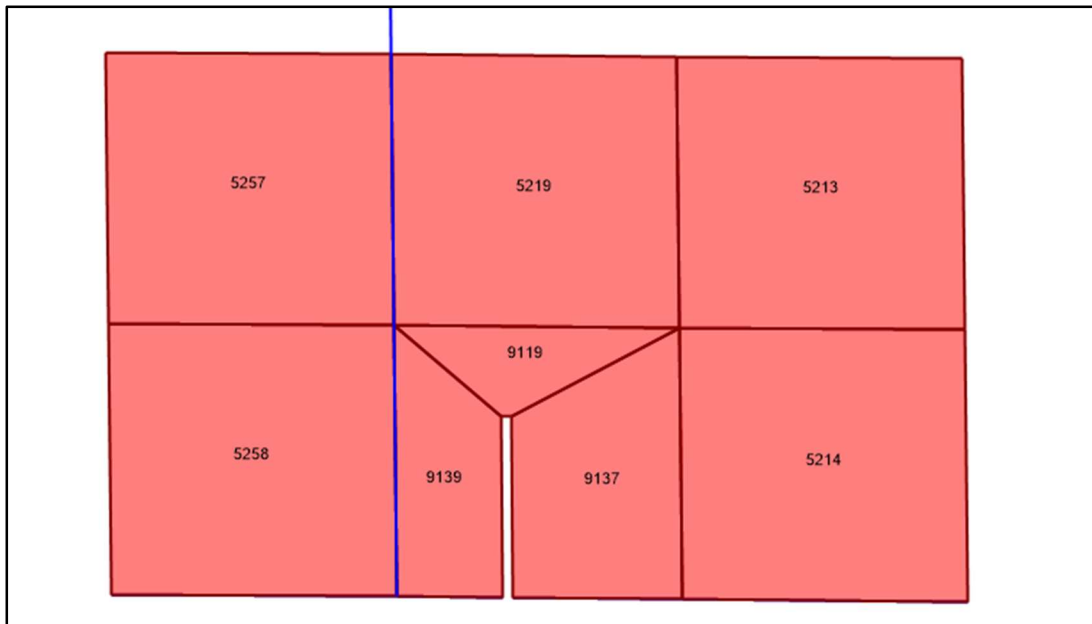


Tabla 15. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en el área con la grieta 2, viga izquierda.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
9119	1	21.019	-0.64	73.627	-21.373	52.608	250.3	20.733	3239.5
	2	22.489	8.193	146.488	64.223	123.999	551.4	56.03	683.9
	3	21.697	4.017	549.96	135.743	528.263	2434.7	131.726	3279.2
	4	22.402	4.164	768.68	144.229	746.278	3331.3	140.065	3363.7
9137	1	18.302	-0.203	167.052	-19.446	148.75	812.8	19.243	9479.3
	2	24.62	7.364	298.943	64.906	274.323	1114.2	57.542	781.4
	3	24.907	7.625	114.46	-12.587	89.553	359.5	20.212	265.1
	4	23.028	2.909	8.781	-64.934	14.247	61.9	67.843	2332.2
9139	1	23.264	-0.726	266.664	78.72	243.4	1046.3	79.446	10943.0
	2	22.364	1.393	154.014	32.342	131.65	588.7	30.949	2221.8
	3	24.031	2.578	-2.665	-5.736	26.696	111.1	8.314	322.5
	4	23.25	-0.141	64.89	0.56	41.64	179.1	0.701	497.2

Tabla 16. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + carga de viento, en el área con la grieta 2, viga izquierda.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
9119	1	20.32	0.059	47.543	2.115	27.223	134.0	2.056	3484.7
	2	22.287	8.395	82.783	118.383	60.496	271.4	109.988	1310.2
	3	21.136	4.577	490.791	164.017	469.655	2222.1	159.44	3483.5
	4	21.657	4.909	541.586	334.858	519.929	2400.7	329.949	6721.3
9137	1	16.789	1.31	143.249	-1.911	126.46	753.2	3.221	245.9
	2	24.483	7.501	221.316	126.994	196.833	804.0	119.493	1593.0
	3	24.905	7.627	27.656	70.024	2.751	11.0	62.397	818.1
	4	22.818	3.119	-7.943	-45.968	30.761	134.8	49.087	1573.8
9139	1	22.399	0.139	219.849	109.964	197.45	881.5	109.825	79010.8
	2	21.664	2.093	139.599	39.175	117.935	544.4	37.082	1771.7
	3	23.853	2.756	-4.192	-3.857	28.045	117.6	6.613	239.9
	4	22.831	0.278	13.882	48.085	8.949	39.2	47.807	17196.8

Tabla 17. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en las áreas del alma adyacentes a la grieta 2, viga izquierda.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máy. (MPa)	Mín. (MPa)	Máy (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
5213	1	19.153	-1.654	38.899	-18.59	19.746	103.1	16.936	1023.9
	2	19.803	-0.229	56.99	9.952	37.187	187.8	10.181	4445.9
	3	23.391	1.053	106.987	34.944	83.596	357.4	33.891	3218.5
	4	22.763	-0.393	97.652	-2.337	74.889	329.0	1.944	494.7
5214	1	22.786	-1.43	109.558	0.244	86.772	380.8	1.674	117.1
	2	22.747	-1.307	113.083	-22.712	90.336	397.1	21.405	1637.7
	3	24.057	-0.247	33.02	-65.094	8.963	37.3	64.847	26253.8
	4	24.08	-0.343	27.259	-40.13	3.179	13.2	39.787	11599.7
5219	1	19.496	-1.155	36.298	2.731	16.802	86.2	3.886	336.5
	2	19.832	3.19	26.213	10.502	6.381	32.2	7.312	229.2
	3	21.959	4.235	117.297	38.065	95.338	434.2	33.83	798.8
	4	21.542	-0.029	121.288	36.55	99.746	463.0	36.579	126134.5
5257	1	19.492	2.753	68.829	22.213	49.337	253.1	19.46	706.9
	2	20.439	-1.426	60.457	-1.646	40.018	195.8	0.22	15.4
	3	24.702	-0.831	49.801	-7.763	25.099	101.6	6.932	834.2
	4	23.684	3.42	56.099	18.167	32.415	136.9	14.747	431.2
5258	1	24.072	5.176	56.263	13.841	32.191	133.7	8.665	167.4
	2	24.575	-4.553	58.358	-4.635	33.783	137.5	0.082	1.8
	3	31.02	-1.223	20.016	-19.429	11.004	35.5	18.206	1488.6
	4	30.953	8.06	15.997	0.952	14.956	48.3	7.108	88.2

Tabla 18. Diferencia de esfuerzos en *los planos x y* y debido a la combinación de carga permanente + carga de viento, en las áreas del alma adyacentes a la grieta 2, viga izquierda.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
5213	1	18.288	-0.789	36.939	-17.698	18.651	101.9849	16.909	2143.093
	2	18.798	0.775	47.159	16.768	28.361	150.8724	15.993	2063.613
	3	22.472	1.972	102.277	33.573	79.805	355.1308	31.601	1602.485
	4	21.967	0.404	92.024	-0.841	70.057	318.9193	1.245	308.1683
5214	1	21.736	-0.379	95.153	9.772	73.417	337.7668	10.151	2678.364
	2	21.776	-0.337	90.917	-4.474	69.141	317.5101	4.137	1227.596
	3	23.581	0.23	-0.726	-29.974	24.307	103.0787	30.204	13132.17
	4	23.547	0.19	3.604	-16.024	19.943	84.69444	16.214	8533.684
5219	1	17.85	0.491	26.536	10.653	8.686	48.66106	10.162	2069.654
	2	18.971	4.05	25.134	10.011	6.163	32.48643	5.961	147.1852
	3	21.334	4.861	112.307	36.494	90.973	426.4226	31.633	650.7509
	4	20.219	1.295	113.976	37.011	93.757	463.7074	35.716	2757.992
5257	1	18.373	3.871	64.818	21.984	46.445	252.7894	18.113	467.9153
	2	17.582	1.431	57.575	-1.599	39.993	227.4656	3.03	211.74
	3	21.249	2.622	45.211	-5.162	23.962	112.7677	7.784	296.8726
	4	22.033	5.07	52.412	18.458	30.379	137.8795	13.388	264.0631
5258	1	22.524	6.724	51.47	15.369	28.946	128.5118	8.645	128.5693
	2	20.364	-0.342	47.792	3.391	27.428	134.6887	3.733	1091.52
	3	27.876	1.921	8.825	-8.259	19.051	68.34194	10.18	529.9323
	4	30.029	8.983	12.494	3.698	17.535	58.39355	5.285	58.83335

Figura 71. Esfuerzo máximo ocasionado por la carga permanente debido a la grieta 2, viga izquierda.

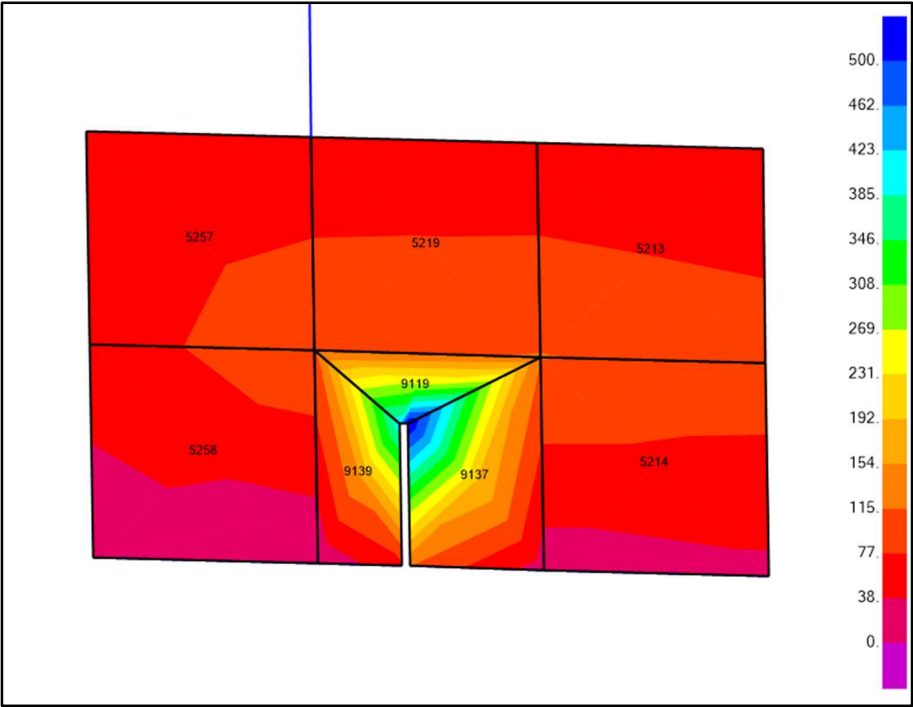


Figura 72. Esfuerzo mínimo ocasionado por la carga permanente debido a la grieta 2, viga izquierda.

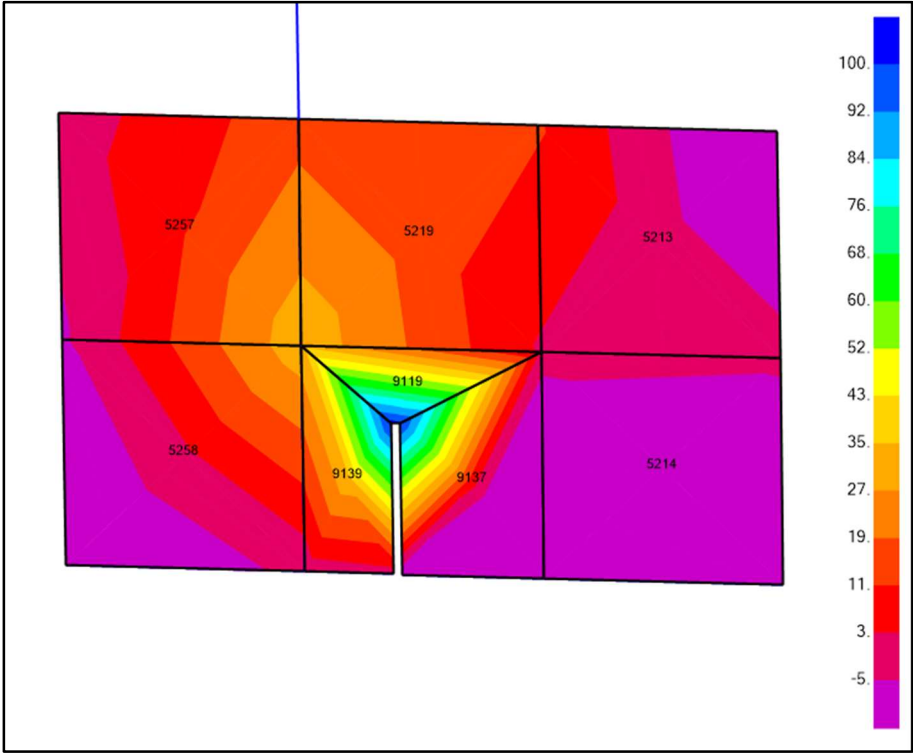


Figura 73. Representación grieta 3, viga izquierda.

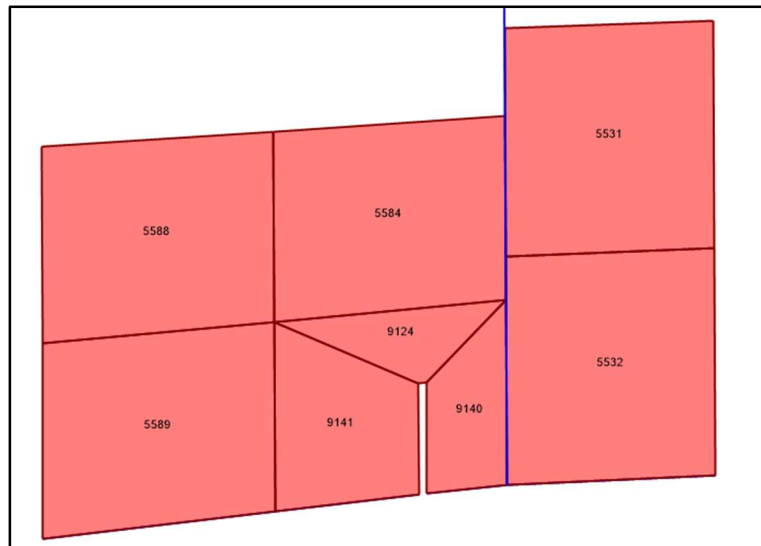


Tabla 19. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en el área con la grieta 3, viga izquierda.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
9124	1	15.296	-32.822	22.323	-40.931	7.027	45.9	8.109	24.7
	2	2.184	-38.907	-110.505	-480.111	112.689	5159.8	441.204	1134.0
	3	-5.42	-27.522	-130.323	-353.314	124.903	2304.5	325.792	1183.8
	4	24.256	-23.022	4.336	-63.727	19.92	82.1	40.705	176.8
9140	1	3.588	-34.886	-24.261	-134.063	27.849	776.2	99.177	284.3
	2	32.392	-24.525	-51.786	-161.872	84.178	259.9	137.347	560.0
	3	11.967	-24.028	-0.591	-45.011	12.558	104.9	20.983	87.3
	4	-1.334	-19.701	12.774	-9.624	14.108	1057.6	10.077	51.1
9141	1	14.581	-30.627	-31.322	-211.428	45.903	314.8	180.801	590.3
	2	11.904	-34.99	26.736	-114.34	14.832	124.6	79.35	226.8
	3	9.729	-21.024	54.496	-9.064	44.767	460.1	11.96	56.9
	4	12.579	-17.889	17.036	-90.633	4.457	35.4	72.744	406.6

Tabla 20. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + carga de viento, en el área con la grieta 3, viga izquierda.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
9124	1	-17.651	0.125	-27.903	7.513	10.252	58.1	7.388	5910.4
	2	-18.381	-18.342	-343.522	-314.583	325.141	1768.9	296.241	1615.1
	3	-18.948	-13.994	-357.543	-175.091	338.595	1787.0	161.097	1151.2
	4	-13.984	15.218	-29.643	-38.582	15.659	112.0	53.8	353.5
9140	1	-24.171	-7.127	-132.189	-30.641	108.018	446.9	23.514	329.9
	2	1.802	6.065	-144.379	-76.156	146.181	8112.2	82.221	1355.7
	3	-13.492	1.431	-11.098	-35.895	2.394	17.7	37.326	2608.4
	4	-16.207	-4.828	-7.198	6.995	9.009	55.6	11.823	244.9
9141	1	-15.687	-0.359	-145.971	-107.503	130.284	830.5	107.144	29845.1
	2	-18.886	-4.2	-93.559	2.362	74.673	395.4	6.562	156.2
	3	-9.971	-1.324	15.085	34.027	25.056	251.3	35.351	2670.0
	4	-7.509	2.199	-8.001	-67.003	0.492	6.6	69.202	3147.0

Tabla 21. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en las áreas del alma adyacentes a la grieta 3, viga izquierda.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
5531	1	-2.072	-25.177	17.303	-35.625	19.375	935.1	10.448	41.5
	2	2.053	-19.554	-0.43	-41.66	2.483	120.9	22.106	113.1
	3	-2.932	-43.06	-13.713	-56.156	10.781	367.7	13.096	30.4
	4	-8.1	-47.799	5.09	-51.194	13.19	162.8	3.395	7.1
5532	1	19.098	-56.502	-1.593	-47.499	20.691	108.3	9.003	15.9
	2	-0.092	-46.952	-11.84	-49.401	11.748	12769.6	2.449	5.2
	3	9.754	-23.182	6.912	-10.986	2.842	29.1	12.196	52.6
	4	29.778	-33.689	11.29	-3.117	18.488	62.1	30.572	90.7
5584	1	2.321	-26.787	-1.535	-34.338	3.856	166.1	7.551	28.2
	2	13.107	-32.67	-5.479	-34.772	18.586	141.8	2.102	6.4
	3	15.859	-33.408	-16.639	-65.171	32.498	204.9	31.763	95.1
	4	4.488	-27.778	-13.775	-63.403	18.263	406.9	35.625	128.2
5588	1	10.896	-29.462	-12.472	-36.737	23.368	214.5	7.275	24.7
	2	9.635	-29.395	11.454	-33.353	1.819	18.9	3.958	13.5
	3	11.168	-29.449	6.916	-66.963	4.252	38.1	37.514	127.4
	4	12.429	-29.49	-17.387	-70.329	29.816	239.9	40.839	138.5
5589	1	14.068	-32.012	26.499	-79.748	12.431	88.4	47.736	149.1
	2	11.896	-31.053	3.842	-74.997	8.054	67.7	43.944	141.5
	3	6.593	-23.996	27.891	-27.937	21.298	323.0	3.941	16.4
	4	8.737	-24.808	51.673	-33.364	42.936	491.4	8.556	34.5

Tabla 22. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + carga de viento, en las áreas del alma adyacentes a la grieta 3, viga izquierda.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
5531	1	-16.542	-10.708	-25.764	5.092	9.222	55.7	15.8	147.6
	2	-14.693	-2.809	-31.57	-13.736	16.877	114.9	10.927	389.0
	3	-36.429	-9.563	-54.793	-20.542	18.364	50.4	10.979	114.8
	4	-38.125	-17.775	-48.983	-1.718	10.858	28.5	16.057	90.3
5532	1	-33.154	-4.25	-50.043	-3.02	16.889	50.9	1.23	28.9
	2	-36.243	-10.801	-53.336	-13.092	17.093	47.2	2.291	21.2
	3	-10.124	-3.304	-5.866	1.353	4.258	42.1	4.657	141.0
	4	-6.786	2.875	-2.442	11.365	4.344	64.0	8.49	295.3
5584	1	-20.015	-4.45	-27.538	-11.696	7.523	37.6	7.246	162.8
	2	-18.063	-1.5	-30.226	-14.361	12.163	67.3	12.861	857.4
	3	-16.515	-1.035	-63.592	-24.147	47.077	285.1	23.112	2233.0
	4	-19.079	-4.212	-60.527	-21.556	41.448	217.2	17.344	411.8
5588	1	-17.29	-1.277	-37.832	-16.518	20.542	118.8	15.241	1193.5
	2	-17.668	-2.092	-29.568	7.442	11.9	67.4	9.534	455.7
	3	-16.579	-1.703	-58.809	-1.379	42.23	254.7	0.324	19.0
	4	-16.147	-0.914	-67.507	-25.391	51.36	318.1	24.477	2678.0
5589	1	-15.881	-2.063	-53.826	0.096	37.945	238.9	2.159	104.7
	2	-16.497	-2.661	-60.352	-13.524	43.855	265.8	10.863	408.2
	3	-15.191	-2.212	-2.158	3.106	13.033	85.8	5.318	240.4
	4	-14.451	-1.619	5.208	16.693	19.659	136.0	18.312	1131.1

Figura 74. Esfuerzo máximo ocasionado por la carga permanente debido a la grieta 3, viga izquierda.

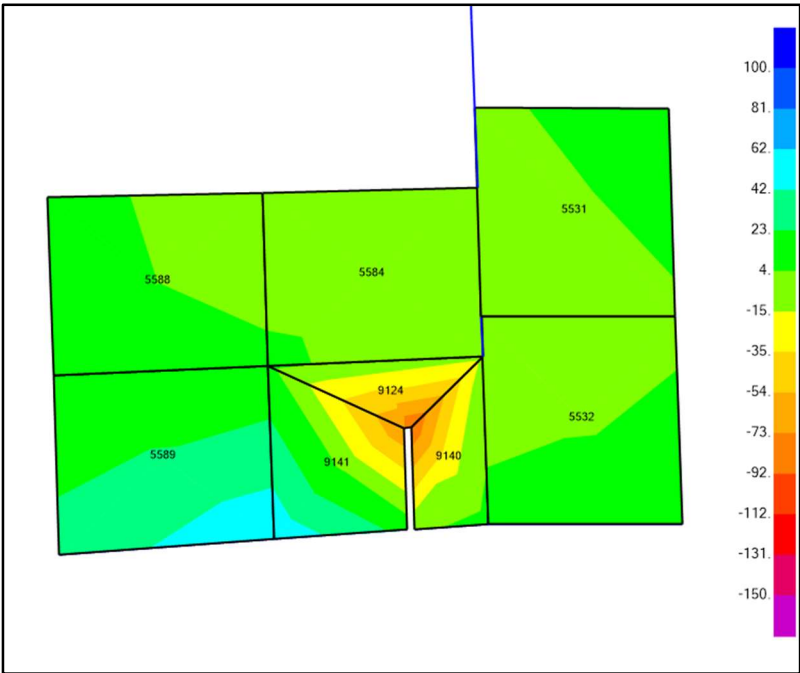


Figura 75. Esfuerzo mínimo ocasionado por la carga permanente debido a la grieta 3, viga izquierda.

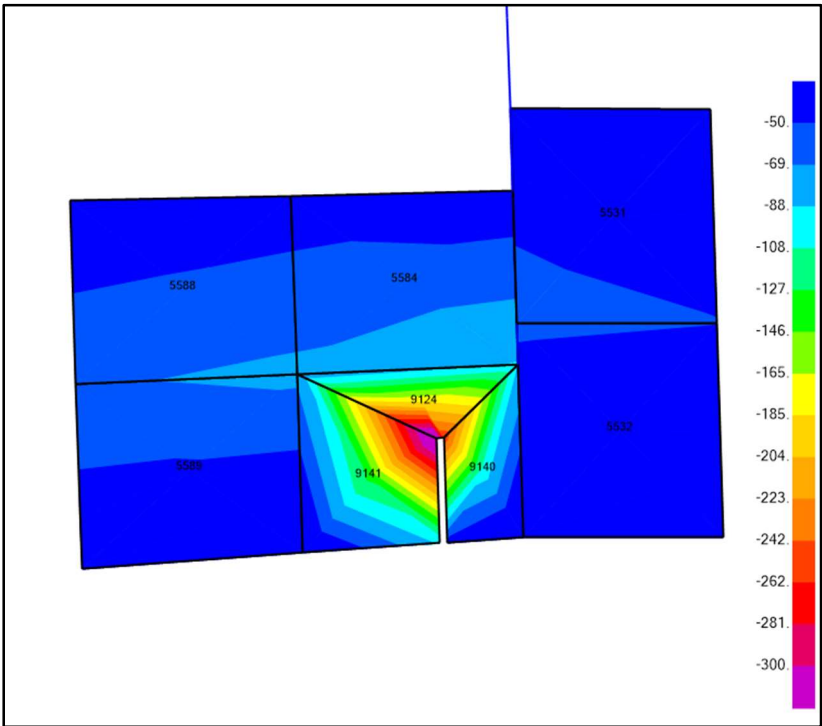


Figura 76. Representación grieta 1, viga derecha.

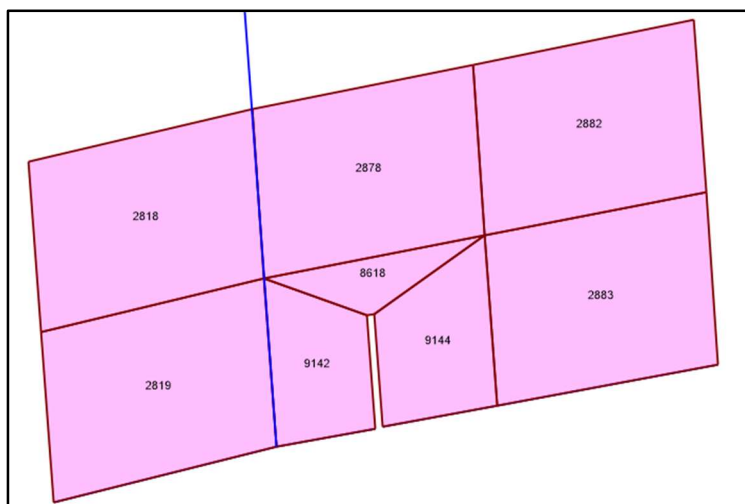


Tabla 23. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en el área con la grieta 1, viga derecha.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
8618	1	-17.669	-43.857	54.752	-95.792	72.421	409.9	51.935	118.4
	2	4.973	-39.536	-277.111	-1171.02	282.084	5672.3	1131.487	2861.9
	3	12.76	-38.018	-154.15	-746.671	166.91	1308.1	708.653	1864.0
	4	5.897	-34.477	-54.157	-178.994	60.054	1018.4	144.517	419.2
9142	1	0.771	-30.675	-32.209	-204.406	32.98	4277.6	173.731	566.4
	2	1.786	-52.323	-78.705	-306.655	80.491	4506.8	254.332	486.1
	3	-4.133	-44.998	22.034	-75.925	26.167	633.1	30.927	68.7
	4	-10.709	-43.827	8.368	4.223	19.077	178.1	48.05	109.6
9144	1	1.192	-40.572	-105.87	-406.457	107.062	8981.7	365.885	901.8
	2	8.84	-38.05	19.584	-247.737	10.744	121.5	209.687	551.1
	3	-1.235	-44.986	92.136	-6.322	93.371	7560.4	38.664	85.9
	4	-8.124	-48.28	1.012	-131.601	9.136	112.5	83.321	172.6

Tabla 24. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + carga de viento, en el área con la grieta 1, viga derecha.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
8618	1	-34.63	-26.896	-75.802	35.745	41.172	118.9	62.641	232.9
	2	-25.983	-8.58	-961.547	-516.358	935.564	3600.7	507.778	5918.2
	3	-26.504	1.246	-603.692	-312.338	577.188	2177.7	313.584	25167.3
	4	-30.526	1.946	-155.632	-84.162	125.106	409.8	86.108	4424.9
9142	1	-23.283	-6.621	-187.037	-51.587	163.754	703.3	44.966	679.1
	2	-36.169	-14.368	-245.556	-141.994	209.387	578.9	127.626	888.3
	3	-35.091	-14.039	11.944	-65.145	47.035	134.0	51.106	364.0
	4	-42.248	-12.288	5.245	6.181	47.493	112.4	18.469	150.3
9144	1	-28.772	-10.608	-355.913	-163.673	327.141	1137.0	153.065	1442.9
	2	-25.757	-3.453	-242.994	11.655	217.237	843.4	15.108	437.5
	3	-38.696	-7.525	0.632	86.946	39.328	101.6	94.471	1255.4
	4	-41.779	-14.625	-60.509	-73.097	18.73	44.8	58.472	399.8

Tabla 25. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en las áreas del alma adyacentes a la grieta 1, viga derecha.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
2818	1	8.751	-36.21	17.72	-58.057	8.969	102.5	21.847	60.3
	2	-3.923	-35.118	-3.011	-53.116	0.912	23.2	17.998	51.3
	3	-5.98	-39.722	1.807	-48.516	7.787	130.2	8.794	22.1
	4	6.394	-40.265	23.599	-54.055	17.205	269.1	13.79	34.2
2819	1	11.719	-39.294	27.229	-57.111	15.51	132.3	17.817	45.3
	2	-5.961	-39.708	3.097	-48.743	9.058	152.0	9.035	22.8
	3	-11.692	-45.406	-0.502	-33.685	11.19	95.7	11.721	25.8
	4	4.149	-42.854	23.8	-41.676	19.651	473.6	1.178	2.7
2878	1	-2.589	-32.99	-16.734	-100.646	14.145	546.3	67.656	205.1
	2	8.396	-36.515	18.983	-102.176	10.587	126.1	65.661	179.8
	3	6.926	-40.221	-33.28	-182.334	40.206	580.5	142.113	353.3
	4	-3.686	-36.756	-56.669	-192.445	52.983	1437.4	155.689	423.6
2882	1	4.551	-34.759	13.692	-91.332	9.141	200.9	56.573	162.8
	2	5.363	-33.779	34.265	-74.334	28.902	538.9	40.555	120.1
	3	3.408	-38.584	6.031	-131.094	2.623	77.0	92.51	239.8
	4	2.571	-39.539	-21.95	-141.207	24.521	953.8	101.668	257.1
2883	1	7.044	-39.971	30.266	-149.452	23.222	329.7	109.481	273.9
	2	7.602	-37.891	-4.301	-145.263	11.903	156.6	107.372	283.4
	3	-0.305	-40.053	49.639	-28.969	49.944	16375.1	11.084	27.7
	4	-1.334	-41.7	89.261	-37.125	90.595	6791.2	4.575	11.0

Tabla 26. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + carga de viento, en las áreas del alma adyacentes a la grieta 1, viga derecha.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
2818	1	-23.647	-3.811	-33.601	-7.884	9.954	42.1	4.073	106.9
	2	-29.997	-9.044	-44.292	-13.525	14.295	47.7	4.481	49.5
	3	-35.121	-10.581	-36.702	-11.363	1.581	4.5	0.782	7.4
	4	-28.59	-5.281	-25.724	-5.601	2.866	10.0	0.32	6.1
2819	1	-26.355	-1.22	-23.849	-7.119	2.506	9.5	5.899	483.5
	2	-35.103	-10.566	-35.809	-10.756	0.706	2.0	0.19	1.8
	3	-43.897	-13.201	-26.545	-8.165	17.352	39.5	5.036	38.1
	4	-34.924	-3.781	-14.246	-4.41	20.678	59.2	0.629	16.6
2878	1	-27.338	-8.241	-91.813	-28.168	64.475	235.8	19.927	241.8
	2	-22.192	-5.927	-71.502	-13.314	49.31	222.2	7.387	124.6
	3	-26.137	-7.158	-175.714	-44.595	149.577	572.3	37.437	523.0
	4	-31.07	-9.372	-196.031	-58.822	164.961	530.9	49.45	527.6
2882	1	-23.811	-6.397	-68.942	-12.75	45.131	189.5	6.353	99.3
	2	-23.478	-4.938	-62.769	23.33	39.291	167.4	28.268	572.5
	3	-28.595	-6.582	-126.99	4.597	98.395	344.1	11.179	169.8
	4	-28.952	-8.017	-133.477	-31.69	104.525	361.0	23.673	295.3
2883	1	-27.162	-5.765	-144.254	25.87	117.092	431.1	31.635	548.7
	2	-27.036	-3.253	-144.76	-6.007	117.724	435.4	2.754	84.7
	3	-34.696	-5.662	-15.781	36.362	18.915	54.5	42.024	742.2
	4	-34.882	-8.152	-14.912	69.259	19.97	57.3	77.411	949.6

Figura 77. Esfuerzo máximo ocasionado por la carga permanente debido a la grieta 1, viga derecha.

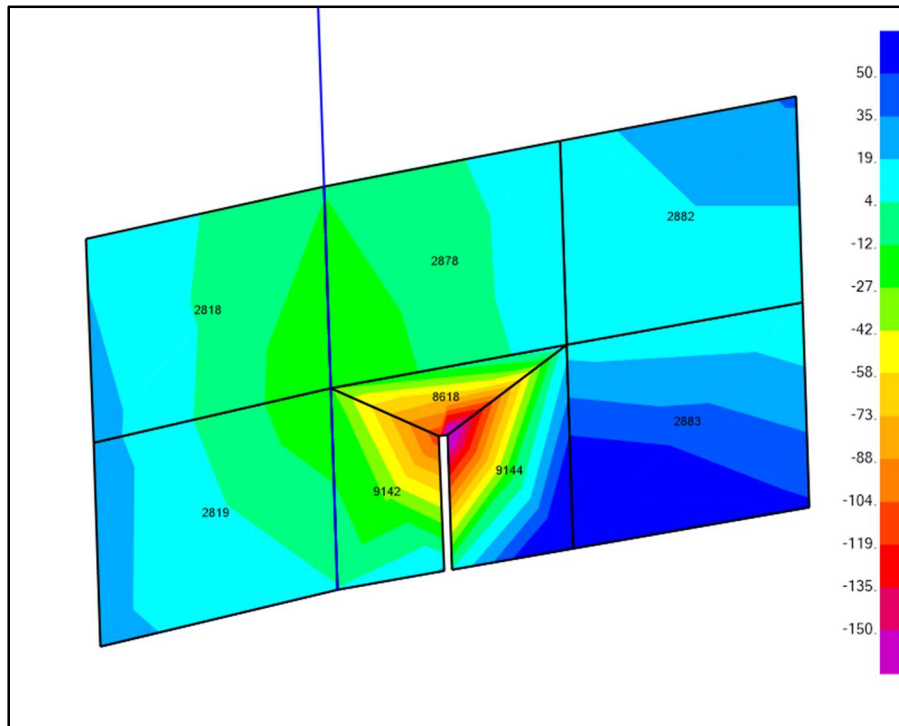


Figura 78. Esfuerzo mínimo ocasionado por la carga permanente debido a la grieta 1, viga derecha.

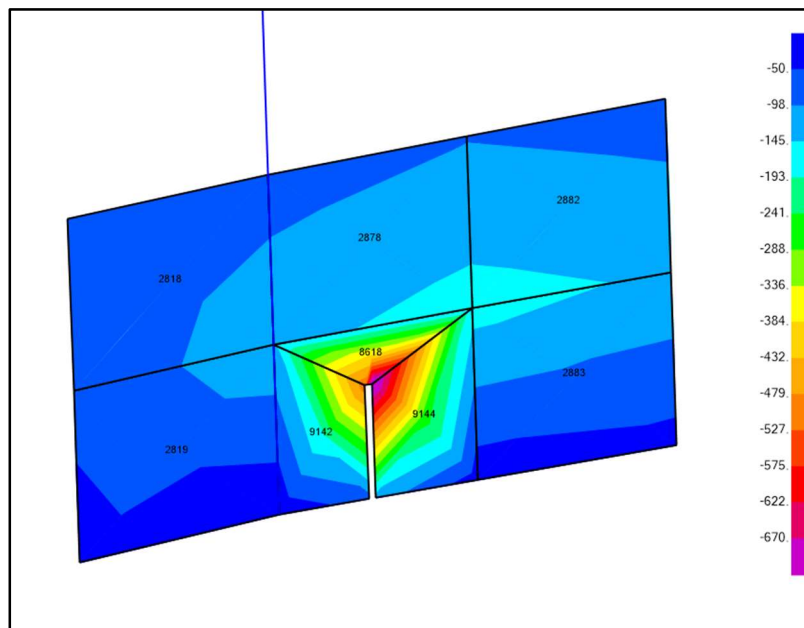


Figura 79. Representación grieta 2, viga derecha.

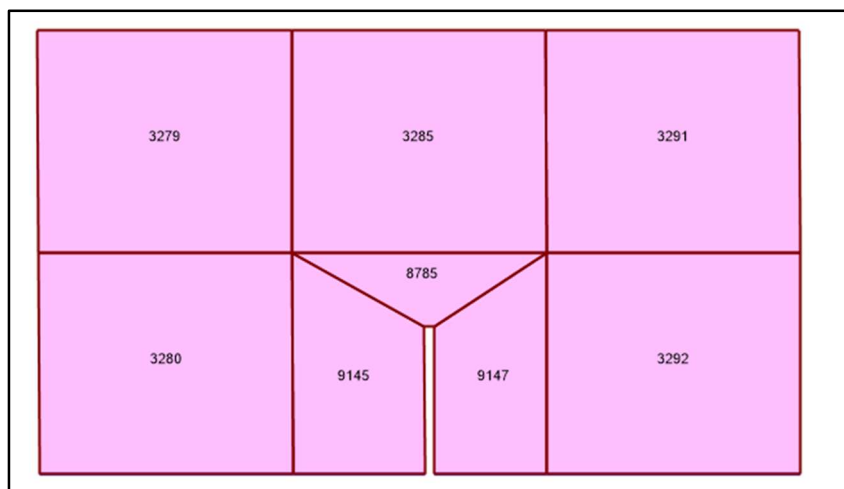


Tabla 27. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en el área con la grieta 2, viga derecha.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
8785	1	27.439	-2.44	62.748	8.342	35.309	128.7	10.782	441.9
	2	28.512	2.508	705.716	196.42	677.204	2375.2	193.912	7731.7
	3	27.145	-2.944	697.521	167.46	670.376	2469.6	170.404	5788.2
	4	27.838	-3.199	73.916	-28.556	46.078	165.5	25.357	792.7
9145	1	28.331	-2.05	154.71	-8.49	126.379	446.1	6.44	314.1
	2	27.352	-3.971	226.466	64.349	199.114	728.0	68.32	1720.5
	3	31.019	-0.638	81.011	4.097	49.992	161.2	4.735	742.2
	4	31.028	0.615	11.127	-51.695	19.901	64.1	52.31	8505.7
9147	1	31.619	-2.124	184.636	-6.78	153.017	483.9	4.656	219.2
	2	28.314	-0.299	21.011	-53.778	7.303	25.8	53.479	17886.0
	3	28.69	-1.339	86.065	8.349	57.375	200.0	9.688	723.5
	4	29.798	-3.266	240.014	56.332	210.216	705.5	59.598	1824.8

Tabla 28. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + carga de viento, en el área con la grieta 2, viga derecha.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
8785	1	24.92	0.079	35.122	35.722	10.202	40.9	35.643	45117.7
	2	26.274	4.746	556.483	359.163	530.209	2018.0	354.417	7467.7
	3	25.7	-1.499	545.809	326.02	520.109	2023.8	327.519	21849.2
	4	25.798	-1.16	30.149	17.192	4.351	16.9	18.352	1582.1
9145	1	26.113	0.168	146.758	2.081	120.645	462.0	1.913	1138.7
	2	24.626	-1.245	186.479	110.297	161.853	657.2	111.542	8959.2
	3	30.035	0.346	23.155	62.263	6.88	22.9	61.917	17895.1
	4	30.278	1.365	-0.967	-41.345	31.245	103.2	42.71	3128.9
9147	1	28.044	1.452	165.328	17.671	137.284	489.5	16.219	1117.0
	2	26.912	1.103	-1.818	-33.477	28.73	106.8	34.58	3135.1
	3	27.736	-0.384	26.289	70.276	1.447	5.2	70.66	18401.0
	4	27.099	-0.567	185.383	118.973	158.284	584.1	119.54	21082.9

Tabla 29. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en las áreas del alma adyacente a la grieta 2, viga derecha.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
3279	1	22.928	-2.763	44.974	-19.243	22.046	96.2	16.48	596.5
	2	23.159	-2.779	69.25	12.131	46.091	199.0	14.91	536.5
	3	26.988	-1.102	108.188	40.423	81.2	300.9	41.525	3768.1
	4	26.786	-1.112	93.274	-0.308	66.488	248.2	0.804	72.3
3280	1	26.605	-2.274	100.572	9.321	73.967	278.0	11.595	509.9
	2	26.416	-3.06	101.881	-9.286	75.465	285.7	6.226	203.5
	3	29.134	-0.676	25.434	-54.67	3.7	12.7	53.994	7987.3
	4	29.334	0.093	20.678	-32.769	8.656	29.5	32.862	35335.5
3285	1	22.682	-2.989	60.545	15.023	37.863	166.9	18.012	602.6
	2	23.51	-1.086	52.147	36.367	28.637	121.8	37.453	3448.7
	3	28.943	0.805	92.654	48.584	63.711	220.1	47.779	5935.3
	4	28.155	-1.137	96.54	31.835	68.385	242.9	32.972	2899.9
3291	1	23.098	-1.602	55.706	28.894	32.608	141.2	30.496	1903.6
	2	21.877	3.134	40.886	6.62	19.009	86.9	3.486	111.2
	3	26.441	3.636	109.565	25.436	83.124	314.4	21.8	599.6
	4	27.718	-1.153	116.842	55.265	89.124	321.5	56.418	4893.1
3292	1	27.634	-5.16	123.259	-13.1	95.625	346.0	7.94	153.9
	2	26.91	5.722	110.885	31.451	83.975	312.1	25.729	449.7
	3	34.469	8.933	30.001	-19.398	4.468	13.0	28.331	317.1
	4	34.687	-1.452	53.625	-75.414	18.938	54.6	73.962	5093.8

Figura 80. Esfuerzo máximo ocasionado por la carga permanente debido a la grieta 2, viga derecha.

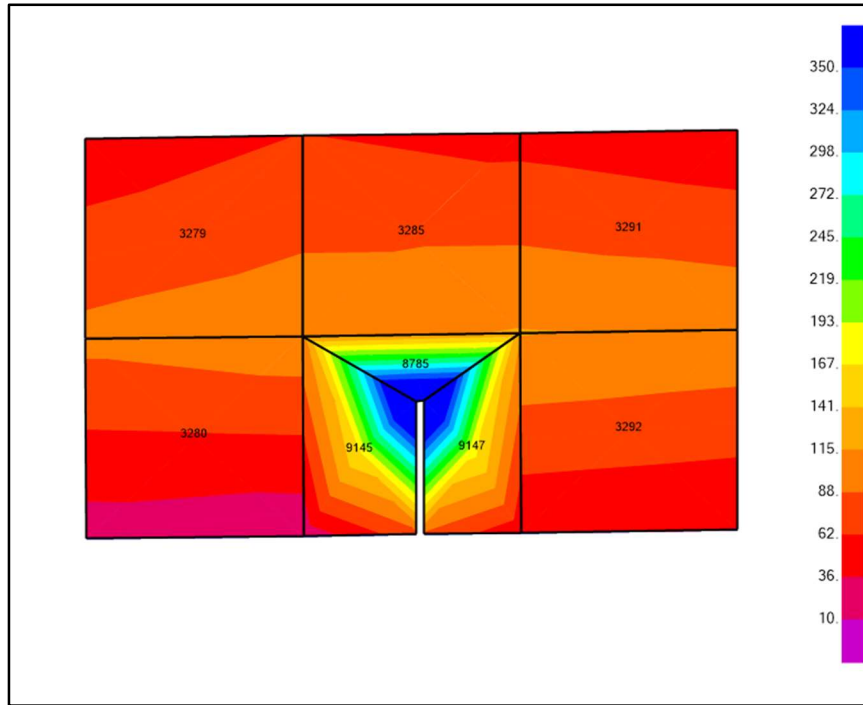


Figura 81. Esfuerzo mínimo ocasionado por la carga permanente debido a la grieta 2, viga derecha.

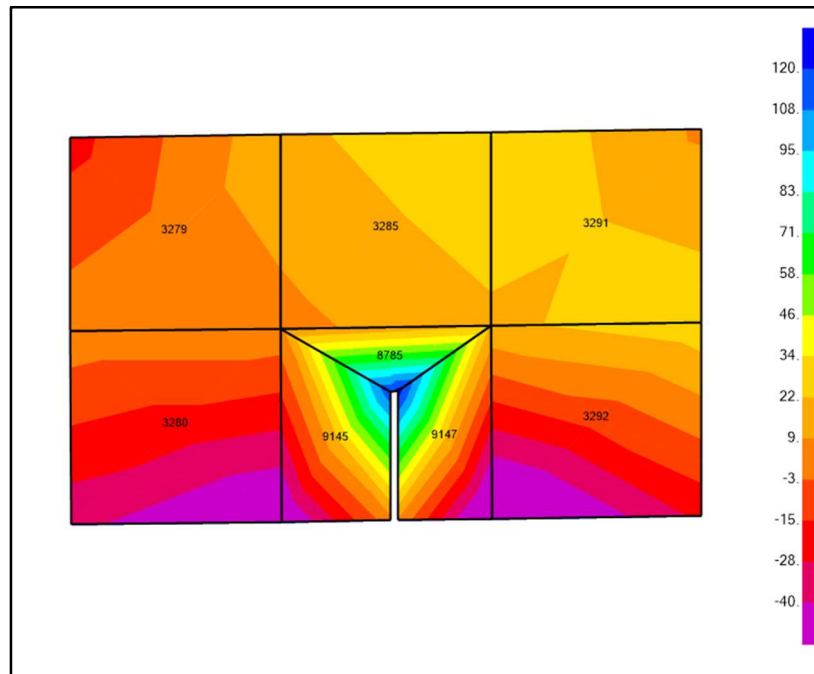


Tabla 30. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + carga de viento, en las áreas del alma adyacentes a la grieta 2, viga derecha.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
3279	1	20.408	-0.243	43.473	-15.196	23.065	113.0	14.953	6153.5
	2	20.429	-0.049	55.754	27.23	35.325	172.9	27.279	55671.4
	3	24.739	1.147	109.72	43.08	84.981	343.5	41.933	3655.9
	4	24.72	0.954	97.319	0.723	72.599	293.7	0.231	24.2
3280	1	24.409	-0.078	100.62	12.188	76.211	312.2	12.266	15725.6
	2	24.157	-0.8	96.795	-0.467	72.638	300.7	0.333	41.6
	3	28.11	0.347	-1.688	-28.654	29.798	106.0	29.001	8357.6
	4	28.363	1.064	2.247	-16.476	26.116	92.1	17.54	1648.5
3285	1	19.899	-0.207	52.142	26.186	32.243	162.0	26.393	12750.2
	2	20.496	1.929	53.219	38.432	32.723	159.7	36.503	1892.3
	3	26.208	3.539	93.999	50.537	67.791	258.7	46.998	1328.0
	4	25.611	1.407	93.246	38.099	67.635	264.1	36.692	2607.8
3291	1	19.78	1.716	49.734	37.394	29.954	151.4	35.678	2079.1
	2	20.55	4.461	39.587	6.927	19.037	92.6	2.466	55.3
	3	24.533	5.543	108.788	27.4	84.255	343.4	21.857	394.3
	4	23.762	2.803	118.728	57.947	94.966	399.7	55.144	1967.3
3292	1	22.816	-0.341	103.33	7.509	80.514	352.9	7.85	2302.1
	2	25.125	7.507	110.865	33.435	85.74	341.3	25.928	345.4
	3	33.415	9.988	8.254	2.155	25.161	75.3	7.833	78.4
	4	31.1	2.135	0.752	-24.413	30.348	97.6	26.548	1243.5

Figura 82. Representación grieta 3, viga derecha.

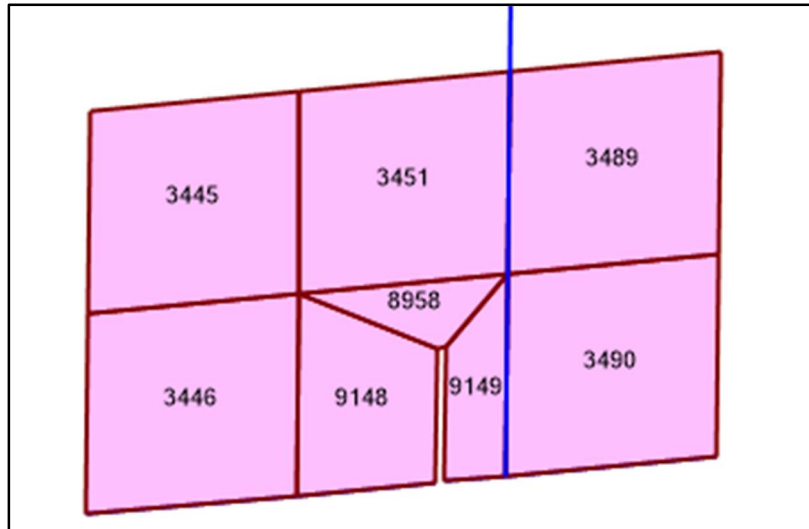


Tabla 31. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en el área con la grieta 3, viga derecha.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máy. (MPa)	Mín. (MPa)	Máy (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
8958	1	27.771	7.667	202.173	117.344	174.402	628.0	109.677	1430.5
	2	34.137	10.076	675.608	201.692	641.471	1879.1	191.616	1901.7
	3	31.458	7.91	904.741	80.435	873.283	2776.0	72.525	916.9
	4	28.917	6.709	105.464	-45.121	76.547	264.7	51.83	772.5
9148	1	27.996	6.616	184.636	-19.532	156.64	559.5	26.148	395.2
	2	27.7	7.924	371.037	81.733	343.337	1239.5	73.809	931.5
	3	28.574	8.631	144.612	-27.185	116.038	406.1	35.816	415.0
	4	26.996	1.529	1.119	-76.217	25.877	95.9	77.746	5084.8
9149	1	27.411	-0.422	376.324	105.984	348.913	1272.9	106.406	25214.7
	2	28.639	6.105	182.822	34.554	154.183	538.4	28.449	466.0
	3	35.12	8.019	-0.422	-5.564	35.542	101.2	13.583	169.4
	4	32.729	1.369	95.301	12.932	62.572	191.2	11.563	844.6

Tabla 32. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + carga de viento, en el área con la grieta 3, viga derecha.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
8958	1	27.308	8.129	122.982	202.332	95.674	350.4	194.203	2389.0
	2	34.056	10.156	656.001	236.121	621.945	1826.2	225.965	2224.9
	3	31.109	8.259	674.352	298.698	643.243	2067.7	290.439	3516.6
	4	28.231	7.395	63.389	-1.894	35.158	124.5	9.289	125.6
9148	1	27.461	7.152	176.685	-6.993	149.224	543.4	14.145	197.8
	2	27.627	7.997	303.772	161.898	276.145	999.5	153.901	1924.5
	3	28.436	8.768	37.605	83.291	9.169	32.2	74.523	849.9
	4	26.436	2.089	-13.999	-62.976	40.435	153.0	65.065	3114.6
9149	1	27.107	-0.118	331.733	164.19	304.626	1123.8	164.308	139244.1
	2	28.363	6.38	174.374	48.685	146.011	514.8	42.305	663.1
	3	34.839	8.301	-3.349	-4.458	38.188	109.6	12.759	153.7
	4	32.604	1.494	36.678	75.623	4.074	12.5	74.129	4961.8

Tabla 33. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en las áreas del alma adyacente a la grieta 3, viga derecha.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máy. (MPa)	Mín. (MPa)	Máy (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
3445	1	23.001	-0.647	50.339	-23.128	27.338	118.9	22.481	3474.7
	2	23.635	1.641	73.977	1.07	50.342	213.0	0.571	34.8
	3	28.972	3.106	125.994	33.885	97.022	334.9	30.779	991.0
	4	28.336	0.82	114.95	-2.901	86.614	305.7	3.721	453.8
3446	1	27.823	-0.785	128.138	3.505	100.315	360.5	4.29	546.5
	2	28.315	0.262	128.331	-25.496	100.016	353.2	25.758	9831.3
	3	31.603	1.518	31.371	-74.683	0.232	0.7	76.201	5019.8
	4	31.213	0.36	29.572	-44.299	1.641	5.3	44.659	12405.3
3451	1	22.579	1.424	50.719	-12.925	28.14	124.6	14.349	1007.7
	2	23.553	5.066	34.54	11.501	10.987	46.6	6.435	127.0
	3	27.15	5.9	149.643	48.638	122.493	451.2	42.738	724.4
	4	26.23	2.206	156.544	33.647	130.314	496.8	31.441	1425.2
3489	1	23.552	5.068	85.081	29.972	61.529	261.2	24.904	491.4
	2	22.574	1.441	75.306	-3.702	52.732	233.6	5.143	356.9
	3	26.223	2.23	66.659	-15.004	40.436	154.2	17.234	772.8
	4	27.147	5.908	73.348	21.761	46.201	170.2	15.853	268.3
3490	1	27.847	8.195	73.618	14.846	45.771	164.4	6.651	81.2
	2	25.568	-0.668	81.092	-15.087	55.524	217.2	14.419	2158.5
	3	32.388	1.165	29.543	-33.224	2.845	8.8	34.389	2951.8
	4	34.638	10.069	19.621	-0.826	15.017	43.4	10.895	108.2

Tabla 34. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + carga de viento, en las áreas del alma adyacentes a la grieta 3, viga derecha.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
3445	1	22.858	-0.504	50.719	-21.652	27.861	121.9	21.148	4196.0
	2	23.501	1.775	60.843	14.402	37.342	158.9	12.627	711.4
	3	28.827	3.251	129.021	34.721	100.194	347.6	31.47	968.0
	4	28.181	0.975	118.754	-1.283	90.573	321.4	2.258	231.6
3446	1	27.69	-0.652	122.776	12.796	95.086	343.4	13.448	2062.6
	2	28.021	0.555	116.215	-8.638	88.194	314.7	9.193	1656.4
	3	31.542	1.58	-1.781	-41.76	33.323	105.6	43.34	2743.0
	4	31.207	0.366	4.856	-20.898	26.351	84.4	21.264	5809.8
3451	1	22.521	1.482	31.595	5.696	9.074	40.3	4.214	284.3
	2	23.548	5.071	29.912	13.773	6.364	27.0	8.702	171.6
	3	27.056	5.994	149.992	49.853	122.936	454.4	43.859	731.7
	4	26.026	2.41	152.111	41.579	126.085	484.5	39.169	1625.3
3489	1	23.548	5.071	85.879	30.743	62.331	264.7	25.672	506.3
	2	22.526	1.49	76.346	-3.247	53.82	238.9	4.737	317.9
	3	26.034	2.419	61.103	-8.193	35.069	134.7	10.612	438.7
	4	27.06	5.995	70.692	25.883	43.632	161.2	19.888	331.7
3490	1	27.753	8.29	69.336	20.853	41.583	149.8	12.563	151.5
	2	25.211	-0.311	64.266	2.856	39.055	154.9	3.167	1018.3
	3	31.878	1.675	9.517	-13.82	22.361	70.1	15.495	925.1
	4	34.425	10.282	14.744	4.262	19.681	57.2	6.02	58.5

Figura 83. Esfuerzo máximo ocasionado por la carga permanente debido a la grieta 3, viga derecha.

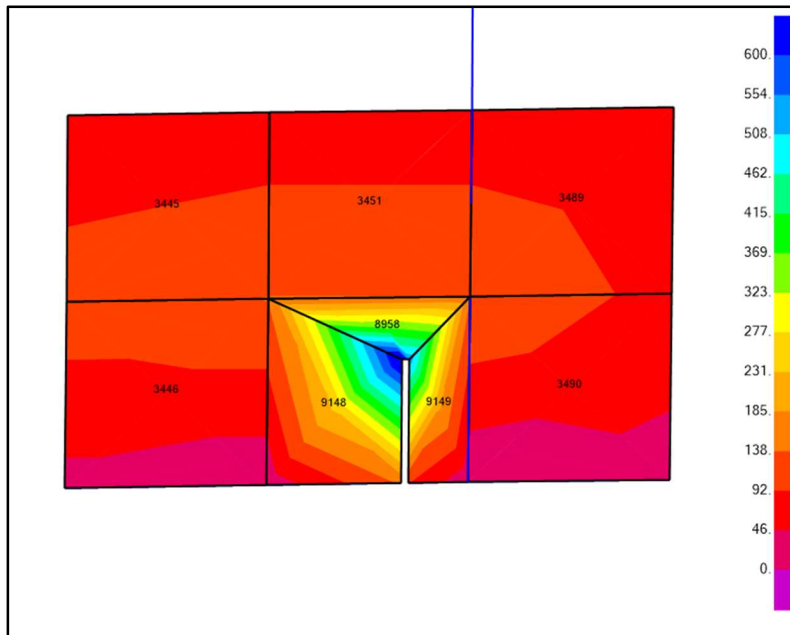
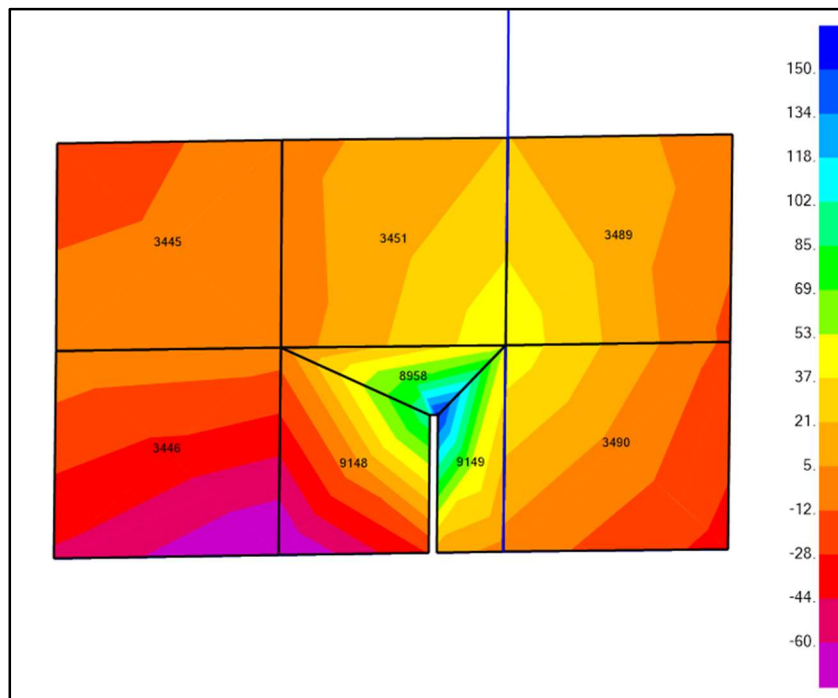


Figura 84. Esfuerzo mínimo ocasionado por la carga permanente debido a la grieta 3, viga derecha.



3.3.2 Corrosión

En las figuras 85 y 86 se presentan gráficos que muestran la relación entre la deformación y el tiempo en los nodos donde se situaban los sensores utilizados en las pruebas de carga, se compara su deformación para los escenarios con y sin corrosión en la estructura. Se simuló el tránsito de la locomotora a 70 km/h. Además, se presentan gráficos que ilustran la representación de cada los elementos con corrosión, junto con tablas que detallan la variación de esfuerzos en ellos.

Figura 85. Gráfico deformación vs tiempo del nodo 2972, con y sin daños de corrosión para el caso ZS4

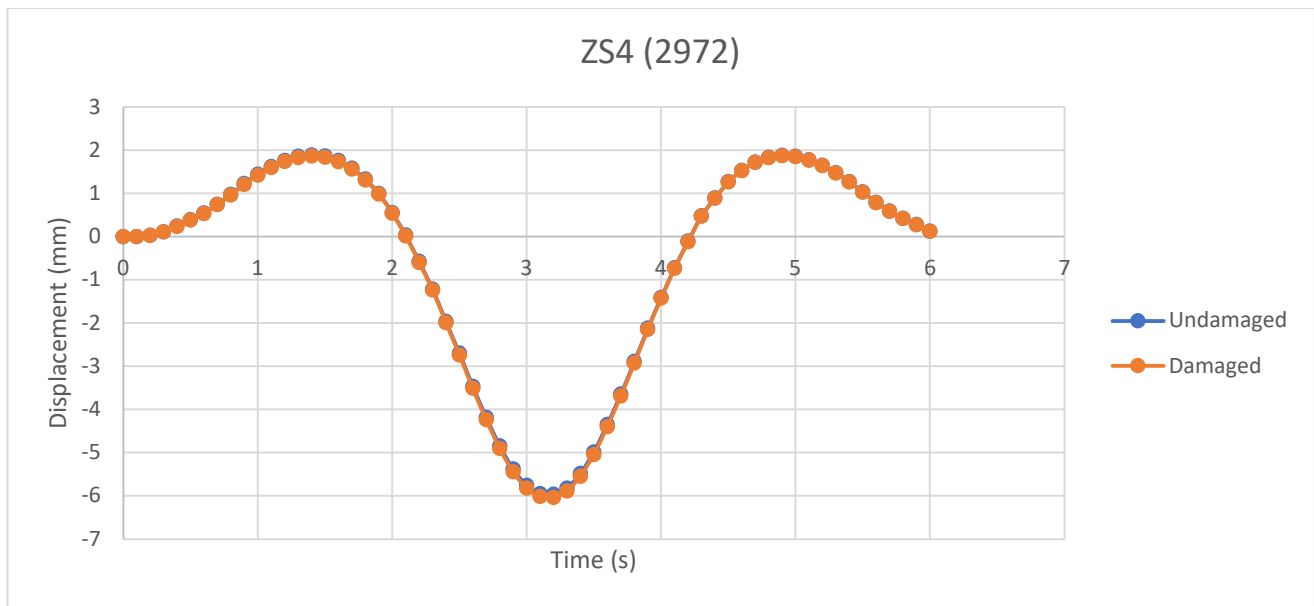


Figura 86. Gráfico deformación vs tiempo del nodo 2973, con y sin daños de corrosión para el caso ZS4

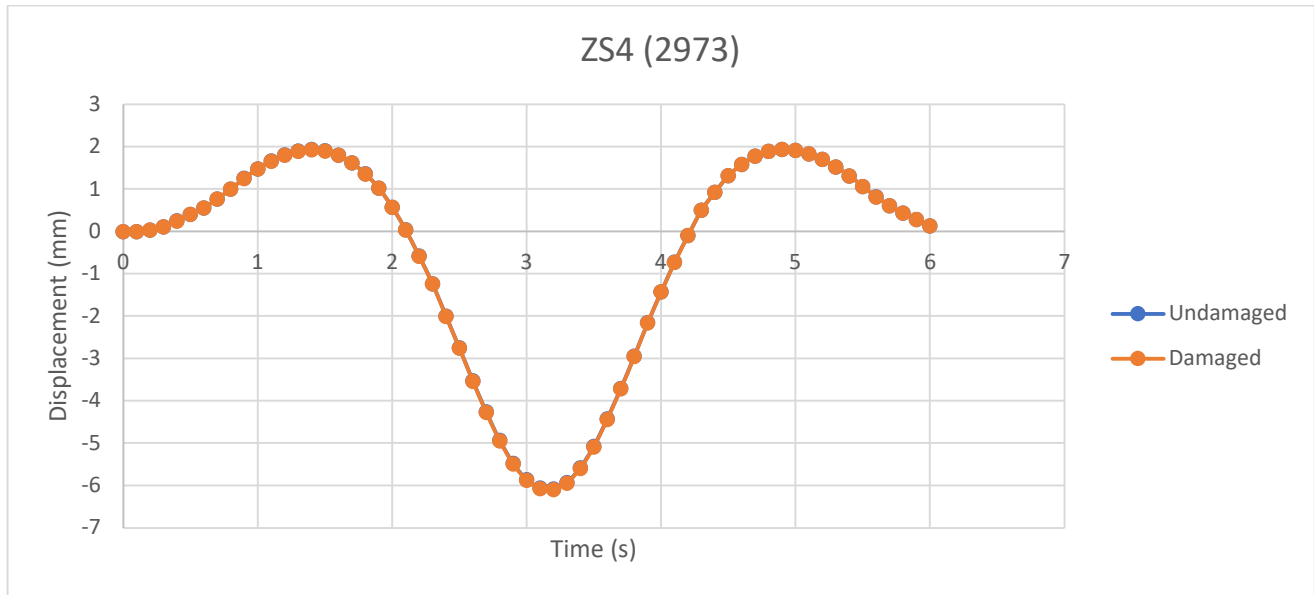


Tabla 35. Diferencia de deformación para los nodos 2972 y 2973 con y sin daños de corrosión simulados para el caso ZS4 (tiempo 0 – 3s)

Tiempo	Def. sin daños nodo 2972 (mm)	Def. con daños nodo 2972 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)	Def. sin daños nodo 2973 (mm)	Def. con daños nodo 2973 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)
0	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
0.1	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
0.2	0.030845	0.030395	0.00045	1.46	0.03162	0.031537	0.000083	0.26
0.3	0.109271	0.107676	0.001595	1.46	0.111839	0.111547	0.000292	0.26
0.4	0.244316	0.240749	0.003567	1.46	0.249986	0.249335	0.000651	0.26
0.5	0.394254	0.388496	0.005758	1.46	0.403274	0.402225	0.001049	0.26
0.6	0.544753	0.536793	0.00796	1.46	0.55721	0.555762	0.001448	0.26
0.7	0.751499	0.740512	0.010987	1.46	0.768757	0.766762	0.001995	0.26
0.8	0.979533	0.965202	0.014331	1.46	1.002107	0.99951	0.002597	0.26
0.9	1.226408	1.208449	0.017959	1.46	1.254695	1.251449	0.003246	0.26
1	1.444005	1.422833	0.021172	1.47	1.477352	1.473537	0.003815	0.26
1.1	1.625423	1.601552	0.023871	1.47	1.663085	1.658801	0.004284	0.26
1.2	1.764763	1.738788	0.025975	1.47	1.805823	1.801185	0.004638	0.26
1.3	1.855906	1.828509	0.027397	1.48	1.899253	1.894394	0.004859	0.26
1.4	1.891188	1.863159	0.028029	1.48	1.935524	1.930596	0.004928	0.25
1.5	1.862723	1.834964	0.027759	1.49	1.906504	1.901681	0.004823	0.25
1.6	1.762528	1.73604	0.026488	1.50	1.804081	1.799553	0.004528	0.25
1.7	1.58556	1.56134	0.02422	1.53	1.623163	1.619105	0.004058	0.25
1.8	1.330045	1.309099	0.020946	1.57	1.361907	1.358457	0.00345	0.25
1.9	1.001493	0.983066	0.018427	1.84	1.025182	1.022766	0.002416	0.24
2	0.558822	0.540432	0.01839	3.29	0.573764	0.570824	0.00294	0.51
2.1	0.035746	0.014619	0.021127	59.10	0.039817	0.036573	0.003244	8.15
2.2	-0.573647	-0.597859	0.024212	4.22	-0.580991	-0.585315	0.004324	0.74
2.3	-1.21161	-1.237903	0.026293	2.17	-1.232808	-1.237165	0.004357	0.35
2.4	-1.961615	-1.994281	0.032666	1.67	-1.9963	-2.002739	0.006439	0.32
2.5	-2.696922	-2.736458	0.039536	1.47	-2.74653	-2.754224	0.007694	0.28
2.6	-3.463044	-3.51152	0.048476	1.40	-3.526417	-3.536703	0.010286	0.29
2.7	-4.183292	-4.239036	0.055744	1.33	-4.259883	-4.27215	0.012267	0.29
2.8	-4.840869	-4.902156	0.061287	1.27	-4.929265	-4.943225	0.01396	0.28
2.9	-5.376606	-5.442167	0.065561	1.22	-5.474865	-5.490025	0.01516	0.28
3	-5.752273	-5.820479	0.068206	1.19	-5.85771	-5.873667	0.015957	0.27

Tabla 36. Diferencia de deformación para los nodos 2972 y 2973 con y sin daños de corrosión simulados (tiempo 3.1s – 6s)

Tiempo	Def. sin daños nodo 2972 (mm)	Def. con daños nodo 2972 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)	Def. sin daños nodo 2973 (mm)	Def. con daños nodo 2973 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)
3.1	-5.944928	-6.014146	0.069218	1.16	-6.054641	-6.071107	0.016466	0.27
3.2	-5.964246	-6.032987	0.068741	1.15	-6.07381	-6.090204	0.016394	0.27
3.3	-5.817971	-5.884647	0.066676	1.15	-5.922496	-5.938257	0.015761	0.27
3.4	-5.481796	-5.544498	0.062702	1.14	-5.578101	-5.593109	0.015008	0.27
3.5	-4.984962	-5.04258	0.057618	1.16	-5.071895	-5.085432	0.013537	0.27
3.6	-4.348345	-4.399895	0.05155	1.19	-4.424833	-4.436845	0.012012	0.27
3.7	-3.643186	-3.687055	0.043869	1.20	-3.704636	-3.714692	0.010056	0.27
3.8	-2.890648	-2.926177	0.035529	1.23	-2.938738	-2.946859	0.008121	0.28
3.9	-2.118188	-2.145137	0.026949	1.27	-2.149658	-2.155713	0.006055	0.28
4	-1.404274	-1.425105	0.020831	1.48	-1.421904	-1.426354	0.00445	0.31
4.1	-0.720933	-0.736426	0.015493	2.15	-0.72317	-0.726273	0.003103	0.43
4.2	-0.102872	-0.114738	0.011866	11.53	-0.093606	-0.09572	0.002114	2.26
4.3	0.482302	0.474364	0.007938	1.65	0.502589	0.50166	0.000929	0.18
4.4	0.895716	0.888858	0.006858	0.77	0.92765	0.927073	0.000577	0.06
4.5	1.274858	1.268278	0.00658	0.52	1.316779	1.316646	0.000133	0.01
4.6	1.531186	1.522784	0.008402	0.55	1.580036	1.57979	0.000246	0.02
4.7	1.724461	1.714453	0.010008	0.58	1.777779	1.777441	0.000338	0.02
4.8	1.839672	1.828579	0.011093	0.60	1.895607	1.895165	0.000442	0.02
4.9	1.882092	1.870436	0.011656	0.62	1.938808	1.938289	0.000519	0.03
5	1.859961	1.84822	0.011741	0.63	1.915587	1.915023	0.000564	0.03
5.1	1.780826	1.769428	0.011398	0.64	1.833753	1.833175	0.000578	0.03
5.2	1.652405	1.641717	0.010688	0.65	1.701228	1.700666	0.000562	0.03
5.3	1.481117	1.471459	0.009658	0.65	1.524684	1.524161	0.000523	0.03
5.4	1.272669	1.264319	0.00835	0.66	1.310059	1.309598	0.000461	0.04
5.5	1.033427	1.026615	0.006812	0.66	1.06384	1.063458	0.000382	0.04
5.6	0.793072	0.787827	0.005245	0.66	0.81631	0.816012	0.000298	0.04
5.7	0.590993	0.58707	0.003923	0.66	0.608348	0.608123	0.000225	0.04
5.8	0.425773	0.422939	0.002834	0.67	0.438192	0.438028	0.000164	0.04
5.9	0.278615	0.276756	0.001859	0.67	0.286908	0.2868	0.000108	0.04
6	0.126878	0.126031	0.000847	0.67	0.130684	0.130635	0.000049	0.04

En las figuras 87, 89, 91, 93 y 95, se presenta un detalle de cada una de las 5 áreas de corrosión, por otra parte, las figuras 88, 90, 92, 94 y 96 se muestra una descripción de la reducción de área aplicada en el análisis.

Figura 87. Área de corrosión 1.

1330	2715	2719	2723	
1331	2716	2720	2724	2728

Como se observa en la figura 88, en el análisis del área de corrosión 1 se simuló una reducción del 35% del área transversal de cada elemento.

Figura 88. Secciones reducidas utilizadas en el área de corrosión 1.

Web 18mm-35%	Web 18mm-35%	Web 18mm-35%	Web 18mm-35%	
Web 18mm-35%	Web 18mm-35%	Web 18mm-35%	Web 18mm-35%	Web 18mm-35%

De acuerdo con la reducción empleada se presentan tablas con la diferencia de esfuerzos para cada una de las áreas.

Tabla 37. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en el área de corrosión 1.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
1330	1	38.056	-89.301	-75.279	43.354	113.335	297.8	132.655	148.5
	2	-3.534	-80.252	-46.342	-7.308	42.808	1211.3	72.944	90.9
	3	-7.414	-101.701	-66.201	-1.264	58.787	792.9	100.437	98.8
	4	35.885	-112.414	-95.137	50.807	131.022	365.1	163.221	145.2
1331	1	58.926	-116.346	-114.768	70.65	173.694	294.8	186.996	160.7
	2	24.059	-72.131	-65.91	34.63	89.969	374.0	106.761	148.0
	3	-12.701	-81.52	-32.959	-7.308	20.258	159.5	74.212	91.0
	4	16.969	-120.495	-81.817	24.286	98.786	582.2	144.781	120.2
2715	1	-6.678	-77.563	40.147	-11.074	46.825	701.2	66.489	85.7
	2	33.399	-84.013	72.42	39.311	39.021	116.8	123.324	146.8
	3	30.985	-107.489	85.612	42.338	54.627	176.3	149.827	139.4
	4	-11.002	-99.181	53.34	-9.441	64.342	584.8	89.74	90.5
2716	1	20.874	-70.051	53.691	26.677	32.817	157.2	96.728	138.1
	2	53.598	-110.777	102	65.261	48.402	90.3	176.038	158.9
	3	13.73	-116.349	73.321	18.672	59.591	434.0	135.021	116.0
	4	-13.767	-80.901	25.012	-13.866	38.779	281.7	67.035	82.9
2719	1	4.522	-80.551	52.812	7.637	48.29	1067.9	88.188	109.5
	2	12.996	-60.884	43.434	18.438	30.438	234.2	79.322	130.3
	3	11.722	-72.474	51.201	20.447	39.479	336.8	92.921	128.2
	4	2.704	-91.638	60.579	9.312	57.875	2140.3	100.95	110.2
2720	1	25.517	-95.389	76.936	32.162	51.419	201.5	127.551	133.7
	2	27.805	-70.421	63.113	41.872	35.308	127.0	112.293	159.5
	3	4.979	-69.798	38.373	15.132	33.394	670.7	84.93	121.7
	4	-1.039	-91.077	52.195	2.264	53.234	5123.6	93.341	102.5
2723	1	8.388	-67.059	46.831	14.745	38.443	458.3	81.804	122.0
	2	17.645	-59.466	42.723	19.267	25.078	142.1	78.733	132.4
	3	13.978	-67.024	43.403	15.266	29.425	210.5	82.29	122.8
	4	4.405	-74.336	47.511	10.453	43.106	978.6	84.789	114.1
2724	1	20.55	-72.562	59.402	31.649	38.852	189.1	104.211	143.6
	2	21.222	-67.245	54.509	30.105	33.287	156.9	97.35	144.8
	3	8.284	-59.272	31.415	15.204	23.131	279.2	74.476	125.7
	4	6.6	-63.612	36.307	16.01	29.707	450.1	79.622	125.2
2728	1	21.943	-68.681	50.752	34.076	28.809	131.3	102.757	149.6
	2	14.548	-55.453	28.252	20.28	13.704	94.2	75.733	136.6
	3	9.282	-48.429	15.815	11.964	6.533	70.4	60.393	124.7
	4	14.13	-59.145	38.315	22.4	24.185	171.2	81.545	137.9

Tabla 38. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la carga permanente en el área de corrosión 1.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
1330	1	-22,662	-28,583	-35,448	-28,559	12,786	56,4	0,024	0,1
	2	-29,843	-53,943	-45,288	-63,853	15,445	51,8	9,91	18,4
	3	-49,372	-59,743	-65,221	-69,787	15,849	32,1	10,044	16,8
	4	-42,104	-34,425	-55,16	-34,608	13,056	31,0	0,183	0,5
1331	1	-37,66	-19,76	-54,983	-34,193	17,323	46,0	14,433	73,0
	2	-35,319	-12,753	-49,448	-17,038	14,129	40,0	4,285	33,6
	3	-70,85	-23,371	-72,61	-23,943	1,76	2,5	0,572	2,4
	4	-73,107	-30,419	-77,931	-41,202	4,824	6,6	10,783	35,4
2715	1	-30,189	-54,052	-42,159	-62,926	11,97	39,7	8,874	16,4
	2	-22,759	-27,854	-33,661	-32,561	10,902	47,9	4,707	16,9
	3	-42,689	-33,815	-49,622	-37,364	6,933	16,2	3,549	10,5
	4	-50,198	-59,985	-58,281	-67,694	8,083	16,1	7,709	12,9
2716	1	-36,164	-13,013	-42,534	-14,974	6,37	17,6	1,961	15,1
	2	-38,185	-18,994	-46,655	-27,702	8,47	22,2	8,708	45,8
	3	-73,138	-29,481	-77,797	-37,056	4,659	6,4	7,575	25,7
	4	-71,199	-23,469	-73,831	-24,298	2,632	3,7	0,829	3,5
2719	1	-42,279	-33,75	-52,954	-38,395	10,675	25,2	4,645	13,8
	2	-36,066	-11,822	-45,327	-11,147	9,261	25,7	0,675	5,7
	3	-45,999	-14,752	-55,34	-14,144	9,341	20,3	0,608	4,1
	4	-52,282	-36,652	-63,107	-41,362	10,825	20,7	4,71	12,9
2720	1	-47,918	-21,954	-60,313	-31,847	12,395	25,9	9,893	45,1
	2	-41,779	-0,837	-51,3	-0,88	9,521	22,8	0,043	5,1
	3	-58,885	-5,934	-61,79	-4,01	2,905	4,9	1,924	32,4
	4	-65,088	-27,027	-70,941	-34,952	5,853	9,0	7,925	29,3
2723	1	-44,335	-14,336	-58,582	-15,164	14,247	32,1	0,828	5,8
	2	-40,702	-1,12	-56,034	-4,972	15,332	37,7	3,852	343,9
	3	-49,389	-3,656	-65,95	-7,929	16,561	33,5	4,273	116,9
	4	-53,086	-16,846	-68,629	-18,09	15,543	29,3	1,244	7,4
2724	1	-48,98	-3,031	-64,744	-4,956	15,764	32,2	1,925	63,5
	2	-47,739	1,716	-63,96	-1,482	16,221	34,0	3,198	186,4
	3	-51,607	0,619	-55,209	1,188	3,602	7,0	0,569	91,9
	4	-52,906	-4,106	-56,119	-2,265	3,213	6,1	1,841	44,8
2728	1	-48,266	1,528	-48,842	3,012	0,576	1,2	1,484	97,1
	2	-47,059	6,154	-47,454	8,496	0,395	0,8	2,342	38,1
	3	-45,77	6,623	-49,649	7,904	3,879	8,5	1,281	19,3
	4	-47,035	2,02	-51,162	2,444	4,127	8,8	0,424	21,0

Tabla 39. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + temperatura en el área de corrosión 1.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
1330	1	-6,815	-17,888	-17,463	-16,95	10,648	156,2	0,938	5,2
	2	-10,029	-29,981	-23,089	-37,889	13,06	130,2	7,908	26,4
	3	-32,522	-36,697	-42,149	-43,583	9,627	29,6	6,886	18,8
	4	-29,227	-24,643	-36,331	-22,744	7,104	24,3	1,899	7,7
1331	1	-26,516	-15,742	-37,139	-25,583	10,623	40,1	9,841	62,5
	2	-16,351	17,345	-24,663	14,848	8,312	50,8	2,497	14,4
	3	-43,93	9,111	-44,513	8,93	0,583	1,3	0,181	2,0
	4	-54,014	-24,018	-56,802	-31,596	2,788	5,2	7,578	31,6
2715	1	-10,387	-30,093	-20,865	-37,232	10,478	100,9	7,139	23,7
	2	-6,979	-17,384	-16,316	-20,295	9,337	133,8	2,911	16,7
	3	-29,743	-24,226	-33,512	-25,487	3,769	12,7	1,261	5,2
	4	-33,23	-36,905	-38,204	-42,39	4,974	15,0	5,485	14,9
2716	1	-17,072	17,123	-20,741	16,015	3,669	21,5	1,108	6,5
	2	-26,997	-15,243	-32,182	-21,247	5,185	19,2	6,004	39,4
	3	-54,026	-23,361	-56,607	-28,592	2,581	4,8	5,231	22,4
	4	-44,182	9,04	-45,304	8,702	1,122	2,5	0,338	3,7
2719	1	-23,705	-22,439	-28,23	-23,909	4,525	19,1	1,47	6,6
	2	-19,306	-6,618	-22,882	-4,493	3,576	18,5	2,125	32,1
	3	-24,259	-8,094	-30,889	-6,918	6,63	27,3	1,176	14,5
	4	-28,729	-23,885	-36,362	-26,303	7,633	26,6	2,418	10,1
2720	1	-26,106	-15,008	-35,178	-22,185	9,072	34,8	7,177	47,8
	2	-22,044	-0,844	-28,96	-0,658	6,916	31,4	0,186	22,0
	3	-42,725	-7,039	-44,108	-5,207	1,383	3,2	1,832	26,0
	4	-46,851	-21,176	-50,448	-26,706	3,597	7,7	5,53	26,1
2723	1	-27,294	-9,043	-35,003	-8,163	7,709	28,2	0,88	9,7
	2	-22,25	8,825	-31,249	5,835	8,999	40,4	2,99	33,9
	3	-26,993	7,421	-40,082	3,164	13,089	48,5	4,257	57,4
	4	-32,101	-10,418	-43,954	-10,803	11,853	36,9	0,385	3,7
2724	1	-29,986	-3,254	-42,155	-4,652	12,169	40,6	1,398	43,0
	2	-26,949	7,455	-38,927	6,857	11,978	44,4	0,598	8,0
	3	-33,602	5,48	-35,162	7,995	1,56	4,6	2,515	45,9
	4	-36,697	-5,203	-38,501	-3,489	1,804	4,9	1,714	32,9
2728	1	-36,088	4,689	-35,403	7,88	0,685	1,9	3,191	68,1
	2	-29,385	27,611	-28,618	31,249	0,767	2,6	3,638	13,2
	3	-21,416	30,025	-23,619	32,766	2,203	10,3	2,741	9,1
	4	-28,177	7,132	-30,517	9,422	2,34	8,3	2,29	32,1

Figura 89. Área de corrosión 2.

1292	2677	2681	2685	2689	2729
	2678	2682	2686	2690	2730

En el área de corrosión 2 se redujeron algunas áreas al 50%, tal y como se muestra en la figura 90

Figura 90. Secciones reducidas utilizadas en el área de corrosión 2.

Web 18mm-35%	Web 18mm-35%	Web 18mm-50%	Web 18mm-50%	Web 18mm-35%	Web 18mm-35%
	Web 18mm-35%	Web 18mm-50%	Web 18mm-50%	Web 18mm-35%	Web 18mm-35%

Tabla 40. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en el área de corrosión 2.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
1292	1	36.27	-17.112	33.041	-17.611	3.229	8.9	0.499	2.9
	2	46.82	15.181	42.376	19.611	4.444	9.5	4.43	29.2
	3	69.178	8.769	73.97	23.063	4.792	6.9	14.294	163.0
	4	47.095	-12.068	57.316	-7.005	10.221	21.7	5.063	42.0
2677	1	75.991	26.613	133.456	40.81	57.465	75.6	14.197	53.3
	2	94.63	5.373	142.622	-6.073	47.992	50.7	11.446	213.0
	3	41.88	-2.681	66.723	-20.604	24.843	59.3	17.923	668.5
	4	34.687	7.174	57.898	25.996	23.211	66.9	18.822	262.4
2678	1	26.814	6.851	58.869	14.3	32.055	119.5	7.449	108.7
	2	31.101	7.401	65.698	7.115	34.597	111.2	0.286	3.9
	3	31.886	13.237	54.235	13.408	22.349	70.1	0.171	1.3
	4	31.183	9.164	50.5	17.554	19.317	61.9	8.39	91.6
2681	1	75.944	20.974	116.831	13.081	40.887	53.8	7.893	37.6
	2	65.099	-1.73	110.8	4.848	45.701	70.2	6.578	380.2
	3	44.525	-12.441	77.663	-9.38	33.138	74.4	3.061	24.6
	4	60.532	5.15	88.514	-5.905	27.982	46.2	11.055	214.7
2682	1	51.458	13.824	88.55	20.859	37.092	72.1	7.035	50.9
	2	50.859	5.629	83.767	9.863	32.908	64.7	4.234	75.2
	3	29.172	2.971	43.743	0.739	14.571	49.9	2.232	75.1
	4	29.826	11.161	48.62	11.699	18.794	63.0	0.538	4.8
2685	1	64.151	-2.304	110.289	2.857	46.138	71.9	5.161	224.0
	2	69.97	20.323	112.157	16.403	42.187	60.3	3.92	19.3
	3	46.774	13.733	74.687	5.307	27.913	59.7	8.426	61.4
	4	40.863	-8.76	71.409	-6.763	30.546	74.8	1.997	22.8
2686	1	46.575	10.176	77.236	12.903	30.661	65.8	2.727	26.8
	2	48.839	14.211	79.851	21.117	31.012	63.5	6.906	48.6
	3	34.867	3.292	56.583	9.584	21.716	62.3	6.292	191.1
	4	31.046	0.854	53.173	2.23	22.127	71.3	1.376	161.1
2689	1	75.783	14.709	119.797	10.355	44.014	58.1	4.354	29.6
	2	70.483	21.871	121.117	36.06	50.634	71.8	14.189	64.9
	3	41.259	-4.41	55.159	15.398	13.9	33.7	19.808	449.2
	4	27.275	7.745	46.72	-3.127	19.445	71.3	10.872	140.4
2690	1	32.758	5.009	52.51	12.218	19.752	60.3	7.209	143.9
	2	30.286	4.199	53.398	13.871	23.112	76.3	9.672	230.3
	3	35.852	0.337	58.229	8	22.377	62.4	7.663	2273.9
	4	38.718	0.787	56.848	6.9	18.13	46.8	6.113	776.7
2729	1	38.572	9.466	33.622	11.761	4.95	12.8	2.295	24.2
	2	30.541	-12.808	26.134	-16.238	4.407	14.4	3.43	26.8
	3	43.608	-10.817	54.297	-8.454	10.689	24.5	2.363	21.8
	4	62.084	1.067	67.127	14.289	5.043	8.1	13.222	1239.2
2730	1	52.13	8.899	65.012	13.288	12.882	24.7	4.389	49.3
	2	49.803	-6.06	59.451	-6.936	9.648	19.4	0.876	14.5
	3	33.988	-16.463	43.846	-16.101	9.858	29.0	0.362	2.2
	4	36.613	-1.751	50.113	3.508	13.5	36.9	5.259	300.3

Tabla 41. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la carga permanente en el área de corrosión 2.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
1292	1	34,622	-15,463	30,967	-15,183	3,655	10,6	0,28	1,8
	2	44,344	17,658	41,65	20,792	2,694	6,1	3,134	17,7
	3	55,864	22,083	66,49	29,276	10,626	19,0	7,193	32,6
	4	46,178	-11,151	55,909	-6,969	9,731	21,1	4,182	37,5
2677	1	75,588	27,016	128,501	46,8	52,913	70,0	19,784	73,2
	2	74,907	25,095	119,604	17,59	44,697	59,7	7,505	29,9
	3	27,468	11,731	40,201	-5,221	12,733	46,4	16,952	144,5
	4	28,094	13,767	49,019	24,083	20,925	74,5	10,316	74,9
2678	1	26,24	7,425	46,522	15,795	20,282	77,3	8,37	112,7
	2	27,269	11,233	47,089	17,7	19,82	72,7	6,467	57,6
	3	31,692	13,431	51,796	20,102	20,104	63,4	6,671	49,7
	4	30,613	9,733	51,145	18,295	20,532	67,1	8,562	88,0
2681	1	72,489	24,429	116,777	16,909	44,288	61,1	7,52	30,8
	2	64,671	-1,303	111,971	1,314	47,3	73,1	2,617	200,8
	3	40,109	-8,025	86,654	-5,705	46,545	116,0	2,32	28,9
	4	47,885	17,797	91,39	10,044	43,505	90,9	7,753	43,6
2682	1	47,823	17,459	98,364	33,247	50,541	105,7	15,788	90,4
	2	45,71	10,778	92,968	15,385	47,258	103,4	4,607	42,7
	3	26,486	5,657	45,749	1,795	19,263	72,7	3,862	68,3
	4	28,557	12,43	51,081	19,8	22,524	78,9	7,37	59,3
2685	1	63,464	-1,616	110,151	0,799	46,687	73,6	2,415	149,4
	2	69,957	20,336	114,94	17,206	44,983	64,3	3,13	15,4
	3	46,691	13,816	88,687	9,697	41,996	89,9	4,119	29,8
	4	40,161	-8,058	83,853	-6,576	43,692	108,8	1,482	18,4
2686	1	45,875	10,876	90,22	14,59	44,345	96,7	3,714	34,1
	2	47,252	15,798	93,558	25,993	46,306	98,0	10,195	64,5
	3	27,748	10,41	58,034	15,697	30,286	109,1	5,287	50,8
	4	26,337	5,563	54,645	4,433	28,308	107,5	1,13	20,3
2689	1	70,079	20,413	42,892	10,742	27,187	38,8	9,671	47,4
	2	70,441	21,913	43,547	13,34	26,894	38,2	8,573	39,1
	3	27,507	9,342	48,695	15,216	21,188	77,0	5,874	62,9
	4	27,116	7,904	48,009	12,686	20,893	77,1	4,782	60,5
2690	1	27,772	9,995	33,553	12,297	5,781	20,8	2,302	23,0
	2	26,94	7,545	25,532	-15,182	1,408	5,2	22,727	301,2
	3	28,014	8,174	51,104	-7,322	23,09	82,4	15,496	189,6
	4	28,816	10,689	59,124	20,243	30,308	105,2	9,554	89,4
2729	1	36,313	11,725	33,406	11,977	2,907	8,0	0,252	2,1
	2	29,554	-11,821	25,386	-15,491	4,168	14,1	3,67	31,0
	3	41,014	-8,223	52,894	-7,051	11,88	29,0	1,172	14,3
	4	47,779	15,372	60,913	20,503	13,134	27,5	5,131	33,4
2730	1	47,32	13,709	60,212	18,088	12,892	27,2	4,379	31,9
	2	43,511	0,232	54,416	-1,901	10,905	25,1	2,133	919,4
	3	23,219	-5,693	35,226	-7,481	12,007	51,7	1,788	31,4
	4	27,033	7,83	41,023	12,599	13,99	51,8	4,769	60,9

Tabla 42. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + temperatura en el área de corrosión 2.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
1292	1	48,496	-7,049	47,562	-4,288	0,934	1,9	2,761	39,2
	2	60,413	33,342	60,424	38,917	0,011	0,0	5,575	16,7
	3	62,46	34,805	71,724	43,168	9,264	14,8	8,363	24,0
	4	50,57	-5,681	58,943	-0,26	8,373	16,6	5,421	95,4
2677	1	81,205	39,569	119,278	56,537	38,073	46,9	16,968	42,9
	2	75,887	21,922	106,122	12,813	30,235	39,8	9,109	41,6
	3	36,853	10,974	44,268	-4,905	7,415	20,1	15,879	144,7
	4	42,131	28,717	57,37	38,898	15,239	36,2	10,181	35,5
2678	1	39,345	19,265	53,862	27,207	14,517	36,9	7,942	41,2
	2	37,809	14,33	51,689	19,83	13,88	36,7	5,5	38,4
	3	41,784	16,284	59,245	22,92	17,461	41,8	6,636	40,8
	4	43,282	21,313	61,359	30,379	18,077	41,8	9,066	42,5
2681	1	73,088	21,143	103,016	12,026	29,928	40,9	9,117	43,1
	2	66,13	-1,989	99,104	-0,857	32,974	49,9	1,132	56,9
	3	50,763	-6,044	90,716	-2,902	39,953	78,7	3,142	52,0
	4	57,69	17,165	94,584	10,107	36,894	64,0	7,058	41,1
2682	1	58,789	20,684	102,095	35,089	43,306	73,7	14,405	69,6
	2	55,85	11,057	95,741	13,9	39,891	71,4	2,843	25,7
	3	39,167	6,607	53,697	1,758	14,53	37,1	4,849	73,4
	4	42,074	16,311	60,012	23,065	17,938	42,6	6,754	41,4
2685	1	64,76	-2,349	97,102	-1,426	32,342	49,9	0,923	39,3
	2	70,542	16,971	101,343	12,883	30,801	43,7	4,088	24,1
	3	56,562	13,156	91,712	10,285	35,15	62,1	2,871	21,8
	4	50,755	-6,098	87,445	-3,914	36,69	72,3	2,184	35,8
2686	1	55,964	11,143	92,528	12,967	36,564	65,3	1,824	16,4
	2	58,099	18,4	96,576	26,565	38,477	66,2	8,165	44,4
	3	41,35	13,756	69,886	18,843	28,536	69,0	5,087	37,0
	4	39,192	6,563	65,807	5,361	26,615	67,9	1,202	18,3
2689	1	70,689	17,06	46,941	11,647	23,748	33,6	5,413	31,7
	2	75,402	32,803	50,572	23,922	24,83	32,9	8,881	27,1
	3	41,665	22,912	60,455	27,13	18,79	45,1	4,218	18,4
	4	36,932	7,222	56,806	14,912	19,874	53,8	7,69	106,5
2690	1	38,575	12,588	53,802	29,496	15,227	39,5	16,908	134,3
	2	40,207	18,164	43,083	-6,654	2,876	7,2	24,818	136,6
	3	40,942	18,613	54,883	-2,994	13,941	34,1	21,607	116,1
	4	39,289	13,093	65,594	33,229	26,305	67,0	20,136	153,8
2729	1	53,978	26,418	53,636	29,155	0,342	0,6	2,737	10,4
	2	44,61	-5,374	42,92	-6,979	1,69	3,8	1,605	29,9
	3	46,467	-4,714	56,771	-2,704	10,304	22,2	2,01	42,6
	4	55,833	27,121	67,478	33,501	11,645	20,9	6,38	23,5
2730	1	54,466	22,483	65,918	28,252	11,452	21,0	5,769	25,7
	2	49,488	5,44	59,33	5,874	9,842	19,9	0,434	8,0
	3	35,074	1,221	45,041	1,7	9,967	28,4	0,479	39,2
	4	40,052	18,304	51,622	24,153	11,57	28,9	5,849	32,0

Figura 91. Área de corrosión 3.

3397	3401	3453	3457
3398	3402	3454	3458

Figura 92. Secciones reducidas utilizadas en el área de corrosión 3.

Web 14mm-35%	Web 14mm-35%	Web 14mm-35%	Web 14mm-35%
Web 14mm-35%	Web 14mm-35%	Web 14mm-35%	Web 14mm-35%

Tabla 43. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en el área de corrosión 3.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
3397	1	0.142	-5.225	-0.611	-7.719	0.753	530.3	2.494	47.7
	2	-0.745	-5.731	-0.581	-7.762	0.164	22.0	2.031	35.4
	3	0.732	-4.021	0.951	-4.546	0.219	29.9	0.525	13.1
	4	1.218	-3.106	0.6	-4.18	0.618	50.7	1.074	34.6
3398	1	-0.125	-3.463	-0.417	-4.552	0.292	233.6	1.089	31.4
	2	-1.024	-4.251	-1.645	-5.471	0.621	60.6	1.22	28.7
	3	1.122	-1.392	0.465	-1.986	0.657	58.6	0.594	42.7
	4	1.52	-0.095	1.06	-0.427	0.46	30.3	0.332	349.5
3401	1	0.042	-6.745	0.403	-9.032	0.361	859.5	2.287	33.9
	2	-4.662	-7.773	-5.414	-10.703	0.752	16.1	2.93	37.7
	3	-2.118	-4.696	-3.391	-5.769	1.273	60.1	1.073	22.8
	4	1.662	-2.731	1.808	-3.475	0.146	8.8	0.744	27.2
3402	1	0.007592	-3.036	-0.618	-4.573	0.625592	8240.1	1.537	50.6
	2	-1.802	-4.053	-3.029	-5.289	1.227	68.1	1.236	30.5
	3	0.846	-2.871	-0.333	-3.465	1.179	139.4	0.594	20.7
	4	1.842	-1.029	1.063	-1.726	0.779	42.3	0.697	67.7
3453	1	-4.706	-7.668	-5.471	-10.514	0.765	16.3	2.846	37.1
	2	-0.032	-6.598	0.317	-8.836	0.349	1090.6	2.238	33.9
	3	1.472	-2.523	1.625	-3.277	0.153	10.4	0.754	29.9
	4	-2.219	-4.587	-3.548	-5.574	1.329	59.9	0.987	21.5
3454	1	-1.898	-3.948	-3.161	-5.12	1.263	66.5	1.172	29.7
	2	-0.165	-2.842	-0.819	-4.332	0.654	396.4	1.49	52.4
	3	1.737	-0.909	0.901	-1.536	0.836	48.1	0.627	69.0
	4	0.826	-2.849	-0.35	-3.423	1.176	142.4	0.574	20.1
3457	1	-0.773	-5.662	-0.591	-7.683	0.182	23.5	2.021	35.7
	2	0.134	-5.186	-0.599	-7.674	0.733	547.0	2.488	48.0
	3	1.103	-2.977	0.514	-4.069	0.589	53.4	1.092	36.7
	4	0.586	-3.85	0.832	-4.391	0.246	42.0	0.541	14.1
3458	1	-1.154	-4.092	-1.777	-5.281	0.623	54.0	1.189	29.1
	2	-0.234	-3.342	-0.507	-4.428	0.273	116.7	1.086	32.5
	3	1.388	0.044	0.895	-0.259	0.493	35.5	0.303	688.6
	4	1.014	-1.261	0.312	-1.806	0.702	69.2	0.545	43.2

Tabla 44. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la carga permanente en el área de corrosión 3.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
3397	1	-5.201	0.119	-7.713	-0.618	2.512	48.3	0.737	619.3
	2	-5.541	-0.935	-7.733	-0.61	2.192	39.6	0.325	34.8
	3	-2.927	-0.362	-3.968	0.373	1.041	35.6	0.735	203.0
	4	-2.592	0.704	-3.957	0.376	1.365	52.7	0.328	46.6
3398	1	-2.983	-0.605	-4.278	-0.692	1.295	43.4	0.087	14.4
	2	-3.387	-1.888	-4.78	-2.337	1.393	41.1	0.449	23.8
	3	0.624	-0.894	-0.369	-1.152	0.993	159.1	0.258	28.9
	4	1.024	0.402	0.125	0.508	0.899	87.8	0.106	26.4
3401	1	-5.721	-0.983	-7.952	-0.676	2.231	39.0	0.307	31.2
	2	-7.063	-5.372	-9.697	-6.419	2.634	37.3	1.047	19.5
	3	-2.552	-4.262	-4.219	-4.94	1.667	65.3	0.678	15.9
	4	-1.216	0.146	-2.486	0.818	1.27	104.4	0.672	460.3
3402	1	-1.664	-1.365	-3.3	-1.891	1.636	98.3	0.526	38.5
	2	-2.334	-3.521	-4.024	-4.294	1.69	72.4	0.773	22.0
	3	0.799	-2.824	-0.422	-3.376	1.221	152.8	0.552	19.5
	4	1.462	-0.649	0.292	-0.955	1.17	80.0	0.306	47.1
3453	1	-7.016	-5.358	-9.596	-6.389	2.58	36.8	1.031	19.2
	2	-5.669	-0.961	-7.858	-0.661	2.189	38.6	0.3	31.2
	3	-1.206	0.155	-2.464	0.812	1.258	104.3	0.657	423.9
	4	-2.546	-4.261	-4.191	-4.932	1.645	64.6	0.671	15.7
3454	1	-2.327	-3.519	-3.996	-4.285	1.669	71.7	0.766	21.8
	2	-1.654	-1.354	-3.272	-1.879	1.618	97.8	0.525	38.8
	3	1.468	-0.639	0.311	-0.946	1.157	78.8	0.307	48.0
	4	0.801	-2.824	-0.403	-3.37	1.204	150.3	0.546	19.3
3457	1	-5.515	-0.92	-7.67	-0.604	2.155	39.1	0.316	34.3
	2	-5.176	0.123	-7.655	-0.618	2.479	47.9	0.741	602.4
	3	-2.579	0.705	-3.923	0.368	1.344	52.1	0.337	47.8
	4	-2.913	-0.351	-3.931	0.371	1.018	34.9	0.722	205.7
3458	1	-3.372	-1.875	-4.738	-2.32	1.366	40.5	0.445	23.7
	2	-2.97	-0.607	-4.242	-0.693	1.272	42.8	0.086	14.2
	3	1.033	0.399	0.137	0.499	0.896	86.7	0.1	25.1
	4	0.636	-0.883	-0.351	-1.143	0.987	155.2	0.26	29.4

Tabla 45. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + temperatura en el área de corrosión 3.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
3397	1	14.188	-0.695	10.509	-1.53	3.679	25.9	0.835	120.1
	2	15.067	2.1	10.942	-0.232	4.125	27.4	2.332	111.0
	3	20.366	3.501	20.488	2.501	0.122	0.6	1	28.6
	4	19.488	0.717	20.06	1.215	0.572	2.9	0.498	69.5
3398	1	19.889	2.027	20.152	1.504	0.263	1.3	0.523	25.8
	2	21.203	6.318	21.77	6.791	0.567	2.7	0.473	7.5
	3	23.527	6.825	24.112	7.368	0.585	2.5	0.543	8.0
	4	22.214	2.546	22.497	2.096	0.283	1.3	0.45	17.7
3401	1	15.62	2.279	12.115	0.127	3.505	22.4	2.152	94.4
	2	19.22	14.148	16.86	15.794	2.36	12.3	1.646	11.6
	3	19.38	13.963	18.74	16.198	0.64	3.3	2.235	16.0
	4	15.78	2.112	13.998	0.547	1.782	11.3	1.565	74.1
3402	1	16.646	4.963	15.295	4.856	1.351	8.1	0.107	2.2
	2	18.513	11.106	17.764	12.962	0.749	4.0	1.856	16.7
	3	22.86	12.176	24.377	14.787	1.517	6.6	2.611	21.4
	4	20.992	6.052	21.91	6.7	0.918	4.4	0.648	10.7
3453	1	19.272	14.164	16.965	15.826	2.307	12.0	1.662	11.7
	2	15.676	2.303	12.215	0.144	3.461	22.1	2.159	93.7
	3	15.791	2.122	14.022	0.542	1.769	11.2	1.58	74.5
	4	19.386	13.965	18.77	16.207	0.616	3.2	2.242	16.1
3454	1	18.52	11.108	17.794	12.971	0.726	3.9	1.863	16.8
	2	16.657	4.975	15.325	4.869	1.332	8.0	0.106	2.1
	3	20.998	6.062	21.931	6.709	0.933	4.4	0.647	10.7
	4	22.862	12.177	24.398	14.793	1.536	6.7	2.616	21.5
3457	1	15.098	2.116	11.004	-0.226	4.094	27.1	2.342	110.7
	2	14.217	-0.69	10.568	-1.53	3.649	25.7	0.84	121.7
	3	19.504	0.718	20.094	1.207	0.59	3.0	0.489	68.1
	4	20.383	3.512	20.526	2.5	0.143	0.7	1.012	28.8
3458	1	21.221	6.332	21.813	6.807	0.592	2.8	0.475	7.5
	2	19.904	2.024	20.188	1.503	0.284	1.4	0.521	25.7
	3	22.225	2.542	22.509	2.087	0.284	1.3	0.455	17.9
	4	23.542	6.837	24.129	7.376	0.587	2.5	0.539	7.9

Figura 93. Área de corrosión 4.

4185	4189	5837	5841	5845
4186	4190	5838		

Figura 94. Secciones reducidas utilizadas en el área de corrosión 4.

Web 18mm-50%	Web 18mm-50%	Web 18mm-50%	Web 18mm-50%	Web 18mm-35%
Web 18mm-35%	Web 18mm-35%	Web 18mm-35%		

Tabla 46. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en el área de corrosión 4.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4185	1	40.773	-0.873	71.056	4.195	30.283	74.3	5.068	580.5
	2	35.187	-17.893	65.399	-14.384	30.212	85.9	3.509	19.6
	3	38.506	-15.045	61.231	-14.898	22.725	59.0	0.147	1.0
	4	44.221	1.733	66.913	3.543	22.692	51.3	1.81	104.4
4186	1	42.995	-3.834	65.028	-1.294	22.033	51.2	2.54	66.2
	2	43.103	-7.1	65.501	-0.425	22.398	52.0	6.675	94.0
	3	36.383	-10.685	52.361	-6.595	15.978	43.9	4.09	38.3
	4	35.475	-6.765	50.777	-6.517	15.302	43.1	0.248	3.7
4189	1	37.822	-19.908	69.052	-19.279	31.23	82.6	0.629	3.2
	2	48.069	14.836	77.903	31.789	29.834	62.1	16.953	114.3
	3	71.811	10.443	103.047	30.446	31.236	43.5	20.003	191.5
	4	49.443	-12.297	81.519	-7.977	32.076	64.9	4.32	35.1
4190	1	54.446	-5.668	87.335	4.935	32.889	60.4	10.603	187.1
	2	58.443	13.07	93.942	29.195	35.499	60.7	16.125	123.4
	3	39.45	5.629	63.818	16.224	24.368	61.8	10.595	188.2
	4	35.317	-13.151	56.246	-7.234	20.929	59.3	5.917	45.0
5837	1	78.954	26.681	149.409	46.24	70.455	89.2	19.559	73.3
	2	100.664	3.566	171.501	-5.878	70.837	70.4	9.444	264.8
	3	46.46	-4.364	85.161	-17.052	38.701	83.3	12.688	290.7
	4	35.199	8.358	67.769	30.338	32.57	92.5	21.98	263.0
5838	1	27.759	5.228	67.692	20.28	39.933	143.9	15.052	287.9
	2	33.965	5.537	72.068	11.607	38.103	112.2	6.07	109.6
	3	35.092	14.328	54.483	16.271	19.391	55.3	1.943	13.6
	4	32.662	10.403	54.872	20.424	22.21	68.0	10.021	96.3
5841	1	79.277	20.161	136.817	22.806	57.54	72.6	2.645	13.1
	2	68.476	-3.033	128.394	11.609	59.918	87.5	14.642	482.8
	3	48.156	-14.055	61.283	-8.664	13.127	27.3	5.391	38.4
	4	64.736	3.419	80.878	-8.507	16.142	24.9	11.926	348.8
5845	1	66.329	-4.009	59.788	-9.037	6.541	9.9	5.028	125.4
	2	73.035	19.867	69.231	20.499	3.804	5.2	0.632	3.2
	3	49.389	14.305	62.436	18.573	13.047	26.4	4.268	29.8
	4	43.074	-9.915	52.532	-10.452	9.458	22.0	0.537	5.4

Tabla 47. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la carga permanente en el área de corrosión 4.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4185	1	40.736	-0.837	70.68	4.57	29.944	73.5	5.407	646.0
	2	35.184	-17.89	64.757	-13.741	29.573	84.1	4.149	23.2
	3	38.435	-14.974	60.501	-14.169	22.066	57.4	0.805	5.4
	4	44.036	1.919	66.47	3.987	22.434	50.9	2.068	107.8
4186	1	42.363	-3.202	64.912	-1.178	22.549	53.2	2.024	63.2
	2	41.435	-5.431	64.789	0.286	23.354	56.4	5.717	105.3
	3	31.8	-6.101	48.965	-3.199	17.165	54.0	2.902	47.6
	4	32.761	-4.051	49.085	-4.825	16.324	49.8	0.774	19.1
4189	1	35.771	-17.856	63.819	-14.046	28.048	78.4	3.81	21.3
	2	45.81	17.095	77.29	32.402	31.48	68.7	15.307	89.5
	3	58.828	23.426	94.786	38.707	35.958	61.1	15.281	65.2
	4	48.852	-11.706	81.413	-7.871	32.561	66.7	3.835	32.8
4190	1	51.424	-2.647	85.787	6.483	34.363	66.8	9.13	344.9
	2	56.462	15.051	92.357	30.78	35.895	63.6	15.729	104.5
	3	33.881	11.197	57.904	22.138	24.023	70.9	10.941	97.7
	4	28.92	-6.753	51.384	-2.371	22.464	77.7	4.382	64.9
5837	1	78.393	27.242	143.25	52.399	64.857	82.7	25.157	92.3
	2	78.737	25.493	136.884	28.739	58.147	73.8	3.246	12.7
	3	29.467	12.629	61.219	6.889	31.752	107.8	5.74	45.5
	4	29.119	14.439	67.592	30.515	38.473	132.1	16.076	111.3
5838	1	26.777	6.21	65.222	22.75	38.445	143.6	16.54	266.3
	2	28.77	10.731	64.849	18.826	36.079	125.4	8.095	75.4
	3	34.365	15.056	53.898	16.856	19.533	56.8	1.8	12.0
	4	32.361	10.704	54.306	20.989	21.945	67.8	10.285	96.1
5841	1	74.985	24.453	132.25	27.373	57.265	76.4	2.92	11.9
	2	67.793	-2.35	128.234	11.769	60.441	89.2	14.119	600.8
	3	42.37	-8.27	60.383	-7.763	18.013	42.5	0.507	6.1
	4	49.579	18.576	64.517	7.854	14.938	30.1	10.722	57.7
5845	1	65.319	-3	59.786	-9.035	5.533	8.5	6.035	201.2
	2	73.025	19.876	69.11	20.62	3.915	5.4	0.744	3.7
	3	49.374	14.32	61.648	19.361	12.274	24.9	5.041	35.2
	4	41.717	-8.558	52.386	-10.306	10.669	25.6	1.748	20.4

Tabla 48. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + temperatura en el área de corrosión 4.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4185	1	51.333	-1.093	72.627	1.148	21.294	41.5	2.241	205.0
	2	48.401	-8.894	69.162	-8.837	20.761	42.9	0.057	0.6
	3	52.121	-7.036	72.487	-7.566	20.366	39.1	0.53	7.5
	4	55.057	0.749	75.936	2.423	20.879	37.9	1.674	223.5
4186	1	55.325	1.783	76.209	3.251	20.884	37.7	1.468	82.3
	2	55.733	4.862	77.322	8.773	21.589	38.7	3.911	80.4
	3	44.974	2.763	60.013	4.153	15.039	33.4	1.39	50.3
	4	44.558	-0.366	58.873	-1.401	14.315	32.1	1.035	282.8
4189	1	50.221	-8.349	70.265	-8.498	20.044	39.9	0.149	1.8
	2	62.258	33.842	87.218	49.657	24.96	40.1	15.815	46.7
	3	65.204	35.484	97.316	52.916	32.112	49.2	17.432	49.1
	4	53.182	-6.717	80.38	-5.206	27.198	51.1	1.511	22.5
4190	1	56.682	5.056	85.35	11.144	28.668	50.6	6.088	120.4
	2	62.251	25.533	93.904	41.822	31.653	50.8	16.289	63.8
	3	45.913	22.036	68.767	34.994	22.854	49.8	12.958	58.8
	4	40.363	1.47	60.225	4.253	19.862	49.2	2.783	189.3
5837	1	84.534	40.801	132.395	63.368	47.861	56.6	22.567	55.3
	2	80.175	23.213	121.248	23.868	41.073	51.2	0.655	2.8
	3	38.701	11.284	67.386	7.952	28.685	74.1	3.332	29.5
	4	43.088	28.793	78.61	47.278	35.522	82.4	18.485	64.2
5838	1	40.152	18.949	75.225	36.285	35.073	87.4	17.336	91.5
	2	39.677	14.595	71.021	19.878	31.344	79.0	5.283	36.2
	3	44.264	17.283	62.031	17.792	17.767	40.1	0.509	2.9
	4	44.765	21.665	66.285	34.213	21.52	48.1	12.548	57.9
5841	1	76.118	21.953	116.03	22.296	39.912	52.4	0.343	1.6
	2	69.705	-2.358	111.978	6.616	42.273	60.6	8.974	380.6
	3	53.132	-6.648	65.685	-6.837	12.553	23.6	0.189	2.8
	4	59.588	17.593	69.896	8.712	10.308	17.3	8.881	50.5
5845	1	67.183	-3.131	64.204	-7.907	2.979	4.4	4.776	152.5
	2	74.158	17.241	72.745	19.125	1.413	1.9	1.884	10.9
	3	59.396	13.637	66.797	17.996	7.401	12.5	4.359	32.0
	4	52.486	-6.825	58.34	-9.134	5.854	11.2	2.309	33.8

Figura 95. Área de corrosión 5.

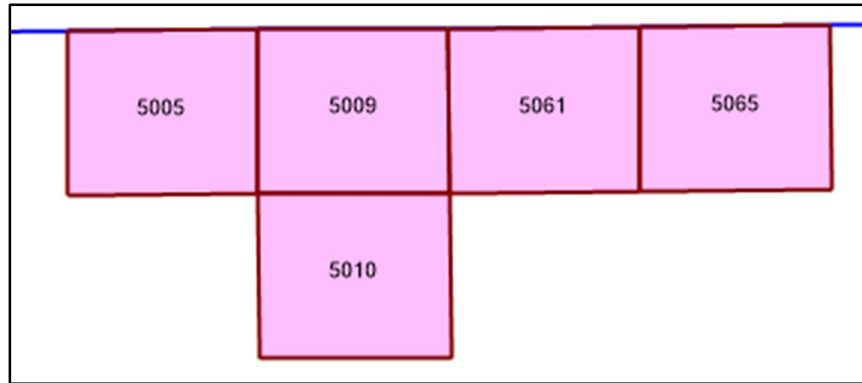


Figura 96. Secciones reducidas utilizadas en el área de corrosión 5.

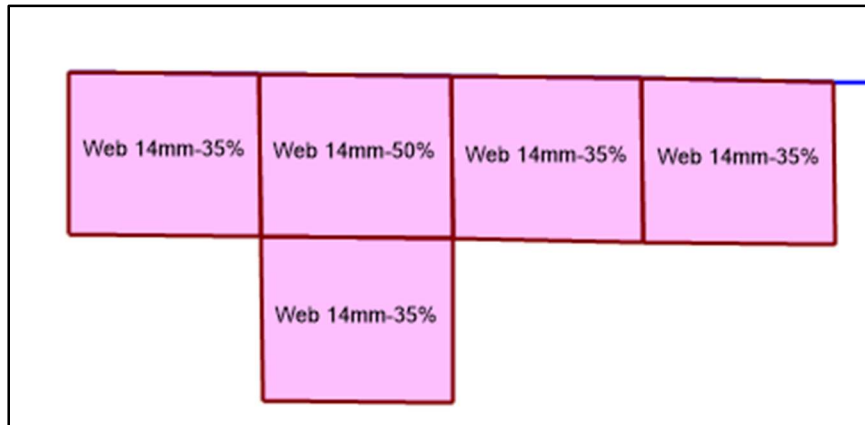


Tabla 49. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos debido a la carga permanente en el área de corrosión 5.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
5005	1	-0.299	-5.432	-0.744	-6.703	0.445	148.8	1.271	23.4
	2	-1.106	-5.788	-0.749	-6.666	0.357	32.3	0.878	15.2
	3	0.445	-3.876	0.557	-3.672	0.112	25.2	0.204	5.3
	4	0.931	-3.212	0.305	-3.463	0.626	67.2	0.251	7.8
5009	1	-0.524	-6.629	-0.621	-9.689	0.097	18.5	3.06	46.2
	2	-4.713	-7.54	-5.666	-11.087	0.953	20.2	3.547	47.0
	3	-2.391	-4.123	-4.144	-5.822	1.753	73.3	1.699	41.2
	4	1.191	-2.621	0.736	-4.279	0.455	38.2	1.658	63.3
5010	1	-0.67	-3.116	-1.406	-4.84	0.736	109.9	1.724	55.3
	2	-2.308	-3.998	-3.765	-5.687	1.457	63.1	1.689	42.2
	3	0.258	-2.427	-0.524	-2.853	0.782	303.1	0.426	17.6
	4	1.118	-0.784	0.598	-0.8	0.52	46.5	0.016	2.0
5061	1	-4.677	-7.639	-4.916	-9.216	0.239	5.1	1.577	20.6
	2	-0.463	-6.76	0.052	-8.09	0.515	111.2	1.33	19.7
	3	1.345	-2.791	1.416	-3.747	0.071	5.3	0.956	34.3
	4	-2.284	-4.238	-3.19	-5.222	0.906	39.7	0.984	23.2
5065	1	-1.087	-5.853	-0.918	-6.834	0.169	15.5	0.981	16.8
	2	-0.293	-5.468	-0.579	-6.613	0.286	97.6	1.145	20.9
	3	1.019	-3.313	0.582	-4.113	0.437	42.9	0.8	24.1
	4	0.557	-4.019	0.601	-4.676	0.044	7.9	0.657	16.3

Tabla 50. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la carga permanente en el área de corrosión 5.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
5005	1	-5.426	-0.306	-6.673	-0.775	1.247	23.0	0.469	153.3
	2	-5.675	-1.219	-6.655	-0.76	0.98	17.3	0.459	37.7
	3	-3.175	-0.256	-3.432	0.317	0.257	8.1	0.573	223.8
	4	-2.92	0.639	-3.44	0.282	0.52	17.8	0.357	55.9
5009	1	-5.868	-1.286	-8.901	-1.409	3.033	51.7	0.123	9.6
	2	-7.024	-5.229	-10.377	-6.376	3.353	47.7	1.147	21.9
	3	-2.807	-3.707	-5.254	-4.711	2.447	87.2	1.004	27.1
	4	-1.643	0.213	-3.765	0.222	2.122	129.2	0.009	4.2
5010	1	-2.192	-1.594	-4.387	-1.858	2.195	100.1	0.264	16.6
	2	-2.754	-3.552	-5.131	-4.321	2.377	86.3	0.769	21.6
	3	0.231	-2.4	-0.579	-2.798	0.81	350.6	0.398	16.6
	4	0.801	-0.467	0.172	-0.374	0.629	78.5	0.093	19.9
5061	1	-7.073	-5.244	-8.34	-5.792	1.267	17.9	0.548	10.5
	2	-5.916	-1.307	-6.946	-1.092	1.03	17.4	0.215	16.4
	3	-1.65	0.204	-2.661	0.33	1.011	61.3	0.126	61.8
	4	-2.813	-3.709	-4.07	-4.343	1.257	44.7	0.634	17.1
5065	1	-5.706	-1.235	-6.728	-1.024	1.022	17.9	0.211	17.1
	2	-5.451	-0.31	-6.613	-0.58	1.162	21.3	0.27	87.1
	3	-2.934	0.639	-3.872	0.341	0.938	32.0	0.298	46.6
	4	-3.194	-0.267	-4	-0.075	0.806	25.2	0.192	71.9

Tabla 51. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y debido a la combinación de carga permanente + temperatura en el área de corrosión 5.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
5005	1	13.724	-1.065	11.756	-1.249	1.968	14.3	0.184	17.3
	2	14.54	1.807	11.998	-0.281	2.542	17.5	2.088	115.6
	3	19.738	3.556	17.818	1.559	1.92	9.7	1.997	56.2
	4	18.921	0.666	17.57	0.57	1.351	7.1	0.096	14.4
5009	1	15.207	1.99	9.517	-1.012	5.69	37.4	3.002	150.9
	2	18.798	14.11	14.293	15.072	4.505	24.0	0.962	6.8
	3	18.723	14.334	25.961	18.698	7.238	38.7	4.364	30.4
	4	15.132	2.191	21.178	2.577	6.046	40.0	0.386	17.6
5010	1	15.873	4.704	21.537	3.779	5.664	35.7	0.925	19.7
	2	17.721	10.95	24.688	14.448	6.967	39.3	3.498	31.9
	3	21.937	12.463	26.439	15.129	4.502	20.5	2.666	21.4
	4	20.091	6.193	23.282	4.421	3.191	15.9	1.772	28.6
5061	1	18.742	14.093	17.624	16.043	1.118	6.0	1.95	13.8
	2	15.15	1.966	13.235	1.262	1.915	12.6	0.704	35.8
	3	15.124	2.182	14.2	1.688	0.924	6.1	0.494	22.6
	4	18.716	14.332	18.588	16.498	0.128	0.7	2.166	15.1
5065	1	14.505	1.789	12.243	0.975	2.262	15.6	0.814	45.5
	2	13.694	-1.07	11.662	-1.109	2.032	14.8	0.039	3.6
	3	18.906	0.666	18.694	1.09	0.212	1.1	0.424	63.7
	4	19.717	3.543	19.279	3.201	0.438	2.2	0.342	9.7

A continuación, para cada área de corrosión se muestra la variación de esfuerzos en X para ambos escenarios: el área sin corrosión se visualiza a la izquierda, mientras que el área con corrosión se muestra a la derecha. La escala de colores, con unidades en megapascales (MPa) permite identificar las diferencias en ambos escenarios.

Figura 97. Diferencia de esfuerzos en X debido a la carga permanente en el área de corrosión 1.

Figura 98. Diferencia de esfuerzos en X debido a la carga permanente en el área de corrosión 2.

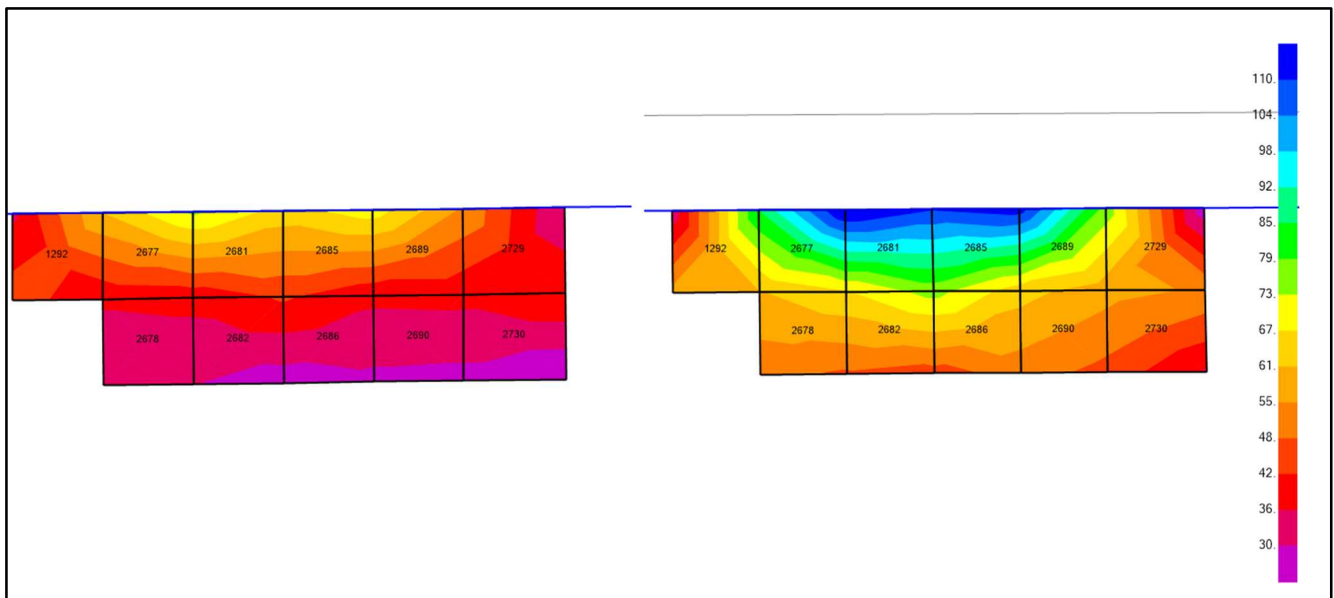
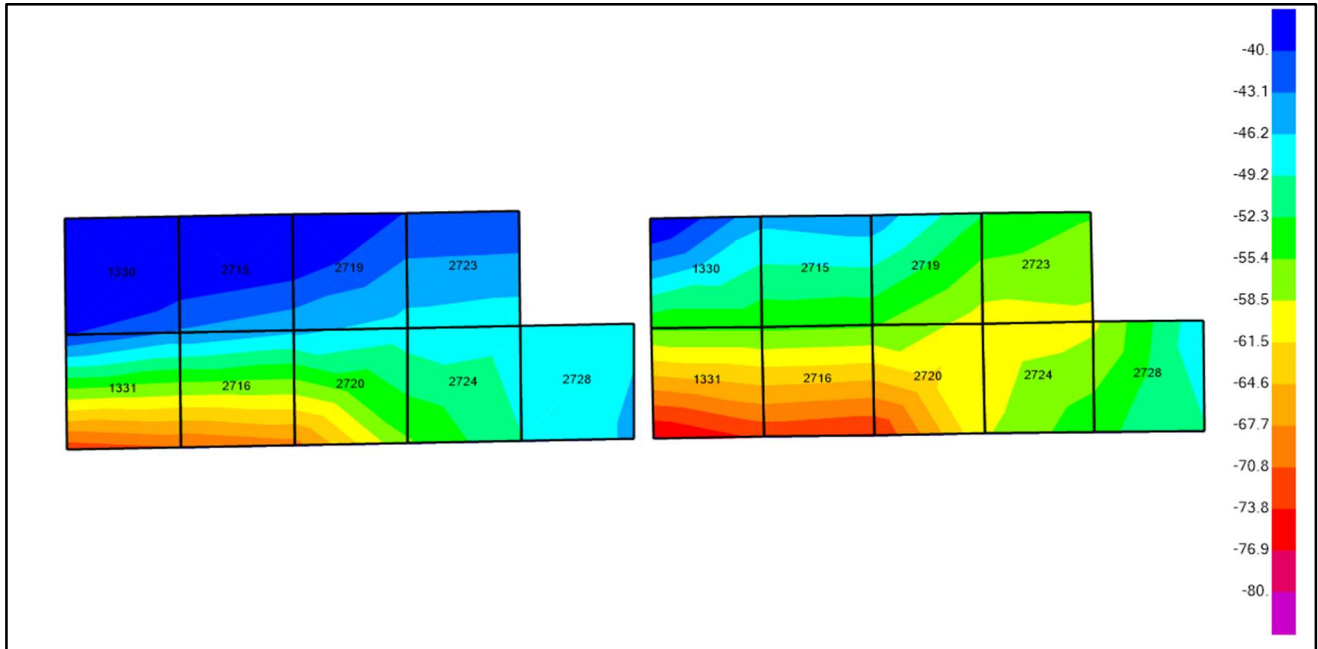


Figura 99. Diferencia de esfuerzos en X debido a la carga permanente en el área de corrosión 3.

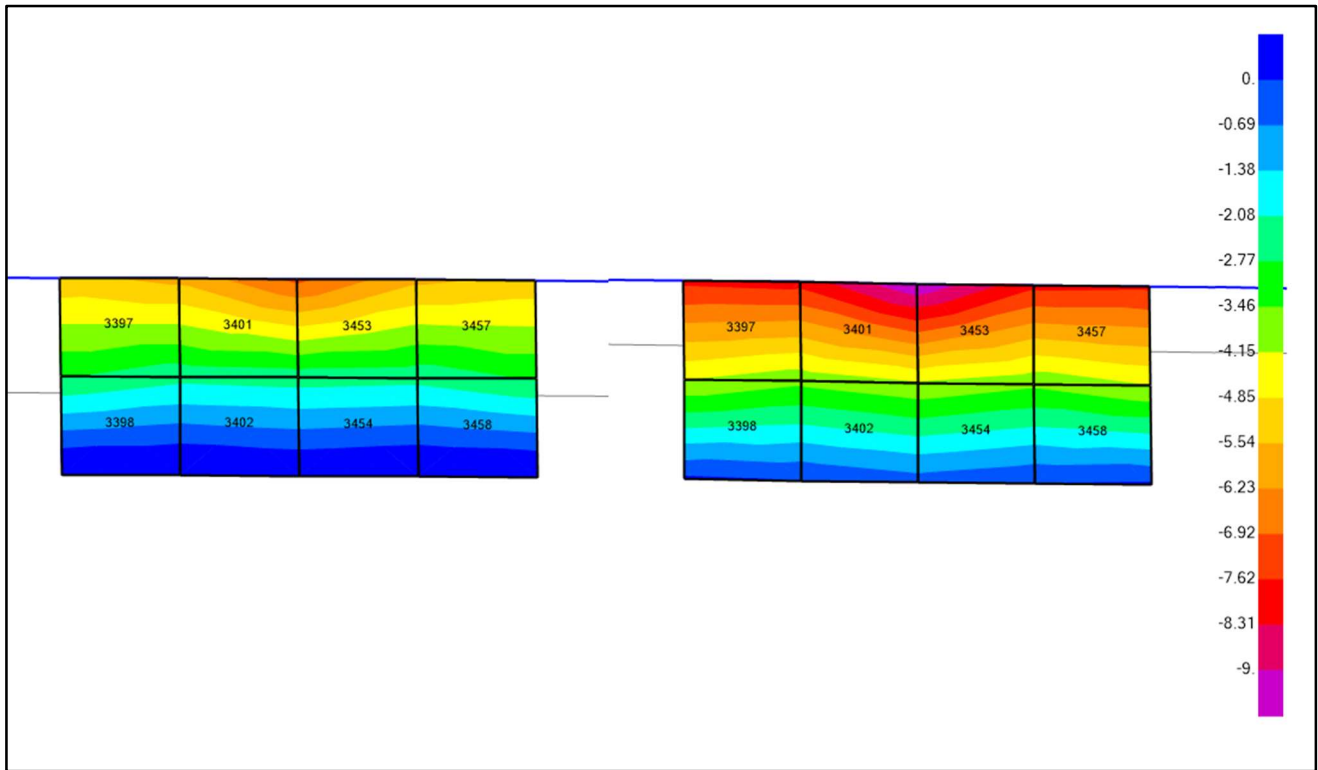


Figura 100. Diferencia de esfuerzos en X debido a la carga permanente en el área de corrosión 4.

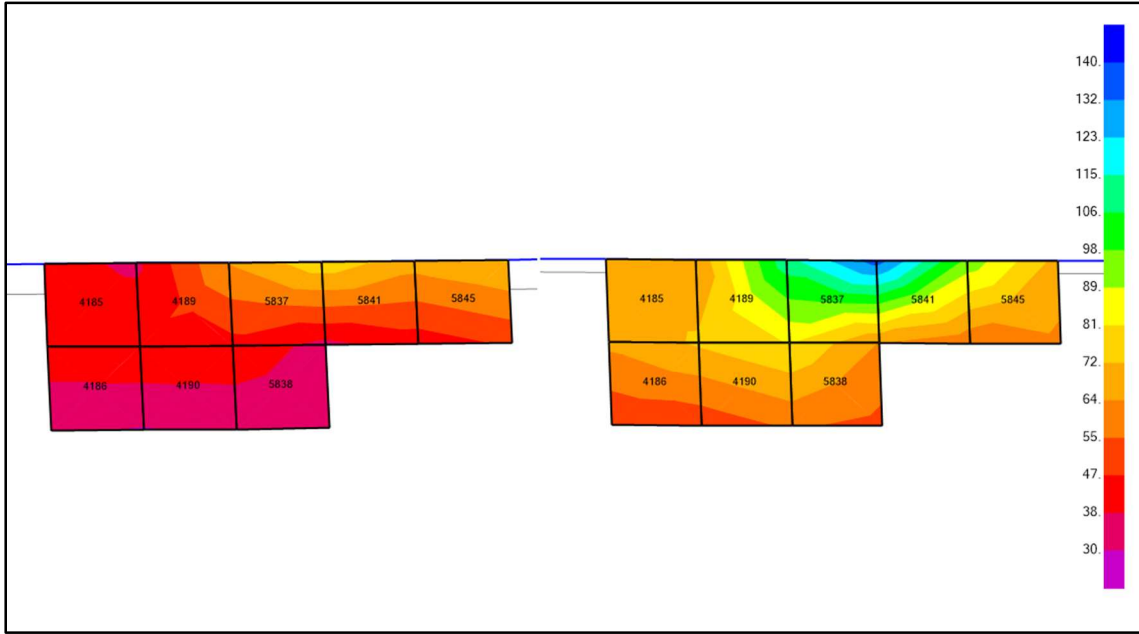
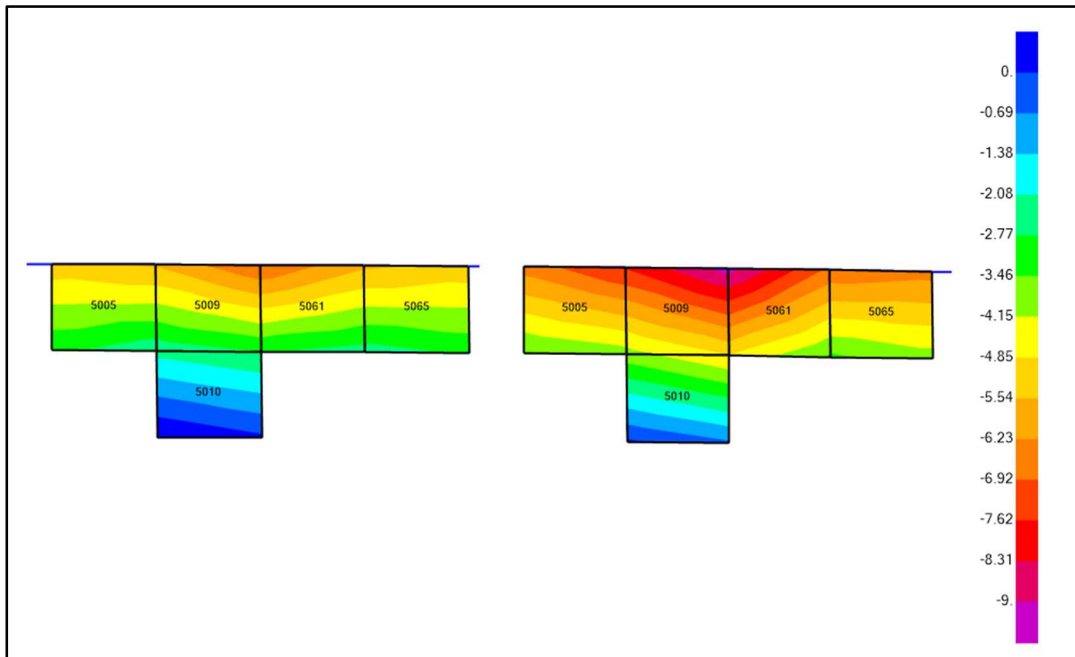


Figura 101. Diferencia de esfuerzos en X debido a la carga permanente en el área de corrosión 5.



En las tablas 52, 53, 54, 55 y 56 se presenta la comparación de esfuerzos ante el caso el caso de carga permanente frente a la combinación de carga permanente + carga térmica -10°C .

Tabla 52. Diferencia de esfuerzos en el área de corrosión 1 en los planos x y y debido a la carga permanente vs carga permanente + carga térmica a -10°C

Área de corrosión	Elemento	Nodo	Dead load		Dead load + temp		σ_x		σ_y	
			σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
1	1330	1	-35.448	-28.559	-17.463	-16.95	17.985	50.74	11.609	68.49
		2	-45.288	-63.853	-23.089	-37.889	22.199	49.02	25.964	68.53
		3	-65.221	-69.787	-42.149	-43.583	23.072	35.38	26.204	60.12
		4	-55.16	-34.608	-36.331	-22.744	18.829	34.14	11.864	52.16
	1331	1	-54.983	-34.193	-37.139	-25.583	17.844	32.45	8.61	33.66
		2	-49.448	-17.038	-24.663	14.848	24.785	50.12	31.886	214.75
		3	-72.61	-23.943	-44.513	8.93	28.097	38.70	32.873	368.12
		4	-77.931	-41.202	-56.802	-31.596	21.129	27.11	9.606	30.40
	2715	1	-42.159	-62.926	-20.865	-37.232	21.294	50.51	25.694	69.01
		2	-33.661	-32.561	-16.316	-20.295	17.345	51.53	12.266	60.44
		3	-49.622	-37.364	-33.512	-25.487	16.11	32.47	11.877	46.60
		4	-58.281	-67.694	-38.204	-42.39	20.077	34.45	25.304	59.69
	2716	1	-42.534	-14.974	-20.741	16.015	21.793	51.24	30.989	193.50
		2	-46.655	-27.702	-32.182	-21.247	14.473	31.02	6.455	30.38
		3	-77.797	-37.056	-56.607	-28.592	21.19	27.24	8.464	29.60
		4	-73.831	-24.298	-45.304	8.702	28.527	38.64	33	379.22
	2719	1	-52.954	-38.395	-28.23	-23.909	24.724	46.69	14.486	60.59
		2	-45.327	-11.147	-22.882	-4.493	22.445	49.52	6.654	148.10
		3	-55.34	-14.144	-30.889	-6.918	24.451	44.18	7.226	104.45
		4	-63.107	-41.362	-36.362	-26.303	26.745	42.38	15.059	57.25
	2720	1	-60.313	-31.847	-35.178	-22.185	25.135	41.67	9.662	43.55
		2	-51.3	-0.88	-28.96	-0.658	22.34	43.55	0.222	33.74
		3	-61.79	-4.01	-44.108	-5.207	17.682	28.62	1.197	22.99
		4	-70.941	-34.952	-50.448	-26.706	20.493	28.89	8.246	30.88
	2723	1	-58.582	-15.164	-35.003	-8.163	23.579	40.25	7.001	85.77
		2	-56.034	-4.972	-31.249	5.835	24.785	44.23	10.807	185.21
		3	-65.95	-7.929	-40.082	3.164	25.868	39.22	11.093	350.60
		4	-68.629	-18.09	-43.954	-10.803	24.675	35.95	7.287	67.45
	2724	1	-64.744	-4.956	-42.155	-4.652	22.589	34.89	0.304	6.53
		2	-63.96	-1.482	-38.927	6.857	25.033	39.14	8.339	121.61
		3	-55.209	1.188	-35.162	7.995	20.047	36.31	6.807	85.14
		4	-56.119	-2.265	-38.501	-3.489	17.618	31.39	1.224	35.08
2728	1	-48.842	3.012	-35.403	7.88	13.439	27.52	4.868	61.78	
	2	-47.454	8.496	-28.618	31.249	18.836	39.69	22.753	72.81	
	3	-49.649	7.904	-23.619	32.766	26.03	52.43	24.862	75.88	
	4	-51.162	2.444	-30.517	9.422	20.645	40.35	6.978	74.06	

Tabla 53. Diferencia de esfuerzos en el área de corrosión 2 en los planos x y y debido a la carga permanente vs carga permanente + carga térmica a -10°C

Área de corrosión	Elemento	Nodo	Dead load		Dead load + temp		σ_x		σ_y	
			σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
2	1292	1	30.967	-15.183	47.562	-4.288	16.595	53.59	10.895	254.08
		2	41.65	20.792	60.424	38.917	18.774	45.08	18.125	46.57
		3	66.49	29.276	71.724	43.168	5.234	7.87	13.892	32.18
		4	55.909	-6.969	58.943	-0.26	3.034	5.43	6.709	2580.38
	2677	1	128.501	46.8	119.278	56.537	9.223	7.18	9.737	17.22
		2	119.604	17.59	106.122	12.813	13.482	11.27	4.777	37.28
		3	40.201	-5.221	44.268	-4.905	4.067	10.12	0.316	6.44
		4	49.019	24.083	57.37	38.898	8.351	17.04	14.815	38.09
	2678	1	46.522	15.795	53.862	27.207	7.34	15.78	11.412	41.95
		2	47.089	17.7	51.689	19.83	4.6	9.77	2.13	10.74
		3	51.796	20.102	59.245	22.92	7.449	14.38	2.818	12.29
		4	51.145	18.295	61.359	30.379	10.214	19.97	12.084	39.78
	2681	1	116.777	16.909	103.016	12.026	13.761	11.78	4.883	40.60
		2	111.971	1.314	99.104	-0.857	12.867	11.49	2.171	253.33
		3	86.654	-5.705	90.716	-2.902	4.062	4.69	2.803	96.59
		4	91.39	10.044	94.584	10.107	3.194	3.49	0.063	0.62
	2682	1	98.364	33.247	102.095	35.089	3.731	3.79	1.842	5.25
		2	92.968	15.385	95.741	13.9	2.773	2.98	1.485	10.68
		3	45.749	1.795	53.697	1.758	7.948	17.37	0.037	2.10
		4	51.081	19.8	60.012	23.065	8.931	17.48	3.265	14.16
	2685	1	110.151	0.799	97.102	-1.426	13.049	11.85	2.225	156.03
		2	114.94	17.206	101.343	12.883	13.597	11.83	4.323	33.56
		3	88.687	9.697	91.712	10.285	3.025	3.41	0.588	5.72
		4	83.853	-6.576	87.445	-3.914	3.592	4.28	2.662	68.01
	2686	1	90.22	14.59	92.528	12.967	2.308	2.56	1.623	12.52
		2	93.558	25.993	96.576	26.565	3.018	3.23	0.572	2.15
		3	58.034	15.697	69.886	18.843	11.852	20.42	3.146	16.70
		4	54.645	4.433	65.807	5.361	11.162	20.43	0.928	17.31
	2689	1	42.892	10.742	46.941	11.647	4.049	9.44	0.905	7.77
		2	43.547	13.34	50.572	23.922	7.025	16.13	10.582	44.24
		3	48.695	15.216	60.455	27.13	11.76	24.15	11.914	43.91
		4	48.009	12.686	56.806	14.912	8.797	18.32	2.226	14.93
	2690	1	33.553	12.297	53.802	29.496	20.249	60.35	17.199	58.31
		2	25.532	-15.182	43.083	-6.654	17.551	68.74	8.528	128.16
		3	51.104	-7.322	54.883	-2.994	3.779	7.39	4.328	144.56
		4	59.124	20.243	65.594	33.229	6.47	10.94	12.986	39.08
	2729	1	33.406	11.977	53.636	29.155	20.23	60.56	17.178	58.92
		2	25.386	-15.491	42.92	-6.979	17.534	69.07	8.512	121.97
		3	52.894	-7.051	56.771	-2.704	3.877	7.33	4.347	160.76
		4	60.913	20.503	67.478	33.501	6.565	10.78	12.998	38.80
	2730	1	60.212	18.088	65.918	28.252	5.706	9.48	10.164	35.98
		2	54.416	-1.901	59.33	5.874	4.914	9.03	7.775	132.36
		3	35.226	-7.481	45.041	1.7	9.815	27.86	9.181	540.06
		4	41.023	12.599	51.622	24.153	10.599	25.84	11.554	47.84

Tabla 54. Diferencia de esfuerzos en el área de corrosión 3 en los planos x y y debido a la carga permanente vs carga permanente + carga térmica a -10°C.

Área de corrosión	Elemento	Nodo	Dead load		Dead load + temp		σ_x		σ_y	
			σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
3	3397	1	-7.713	-0.618	10.509	-1.53	18.222	236.25	0.912	59.61
		2	-7.733	-0.61	10.942	-0.232	18.675	241.50	0.378	162.93
		3	-3.968	0.373	20.488	2.501	24.456	616.33	2.128	85.09
		4	-3.957	0.376	20.06	1.215	24.017	606.95	0.839	69.05
	3398	1	-4.278	-0.692	20.152	1.504	24.43	571.06	2.196	146.01
		2	-4.78	-2.337	21.77	6.791	26.55	555.44	9.128	134.41
		3	-0.369	-1.152	24.112	7.368	24.481	6634.42	8.52	115.64
		4	0.125	0.508	22.497	2.096	22.372	17897.60	1.588	75.76
	3401	1	-7.952	-0.676	12.115	0.127	20.067	252.35	0.803	632.28
		2	-9.697	-6.419	16.86	15.794	26.557	273.87	22.213	140.64
		3	-4.219	-4.94	18.74	16.198	22.959	544.18	21.138	130.50
		4	-2.486	0.818	13.998	0.547	16.484	663.07	0.271	49.54
	3402	1	-3.3	-1.891	15.295	4.856	18.595	563.48	6.747	138.94
		2	-4.024	-4.294	17.764	12.962	21.788	541.45	17.256	133.13
		3	-0.422	-3.376	24.377	14.787	24.799	5876.54	18.163	122.83
		4	0.292	-0.955	21.91	6.7	21.618	7403.42	7.655	114.25
	3453	1	-9.596	-6.389	16.965	15.826	26.561	276.79	22.215	140.37
		2	-7.858	-0.661	12.215	0.144	20.073	255.45	0.805	559.03
		3	-2.464	0.812	14.022	0.542	16.486	669.07	0.27	49.82
		4	-4.191	-4.932	18.77	16.207	22.961	547.86	21.139	130.43
	3454	1	-3.996	-4.285	17.794	12.971	21.79	545.30	17.256	133.04
		2	-3.272	-1.879	15.325	4.869	18.597	568.37	6.748	138.59
		3	0.311	-0.946	21.931	6.709	21.62	6951.77	7.655	114.10
		4	-0.403	-3.37	24.398	14.793	24.801	6154.09	18.163	122.78
	3457	1	-7.67	-0.604	11.004	-0.226	18.674	243.47	0.378	167.26
		2	-7.655	-0.618	10.568	-1.53	18.223	238.05	0.912	59.61
		3	-3.923	0.368	20.094	1.207	24.017	612.21	0.839	69.51
		4	-3.931	0.371	20.526	2.5	24.457	622.16	2.129	85.16
	3458	1	-4.738	-2.32	21.813	6.807	26.551	560.38	9.127	134.08
		2	-4.242	-0.693	20.188	1.503	24.43	575.91	2.196	146.11
		3	0.137	0.499	22.509	2.087	22.372	16329.93	1.588	76.09
		4	-0.351	-1.143	24.129	7.376	24.48	6974.36	8.519	115.50

Tabla 55. Diferencia de esfuerzos en el área de corrosión 4 en los planos x y y debido a la carga permanente vs carga permanente + carga térmica a -10°C.

Área de corrosión	Elemento	Nodo	Dead load		Dead load + temp		σ_x		σ_y	
			σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4	4185	1	70.68	4.57	72.627	1.148	1.947	2.75	3.422	298.08
		2	64.757	-13.741	69.162	-8.837	4.405	6.80	4.904	55.49
		3	60.501	-14.169	72.487	-7.566	11.986	19.81	6.603	87.27
		4	66.47	3.987	75.936	2.423	9.466	14.24	1.564	64.55
	4186	1	64.912	-1.178	76.209	3.251	11.297	17.40	4.429	136.24
		2	64.789	0.286	77.322	8.773	12.533	19.34	8.487	96.74
		3	48.965	-3.199	60.013	4.153	11.048	22.56	7.352	177.03
		4	49.085	-4.825	58.873	-1.401	9.788	19.94	3.424	244.40
	4189	1	63.819	-14.046	70.265	-8.498	6.446	10.10	5.548	65.29
		2	77.29	32.402	87.218	49.657	9.928	12.85	17.255	34.75
		3	94.786	38.707	97.316	52.916	2.53	2.67	14.209	26.85
		4	81.413	-7.871	80.38	-5.206	1.033	1.27	2.665	51.19
	4190	1	85.787	6.483	85.35	11.144	0.437	0.51	4.661	41.83
		2	92.357	30.78	93.904	41.822	1.547	1.68	11.042	26.40
		3	57.904	22.138	68.767	34.994	10.863	18.76	12.856	36.74
		4	51.384	-2.371	60.225	4.253	8.841	17.21	6.624	155.75
	5837	1	143.25	52.399	132.395	63.368	10.855	7.58	10.969	17.31
		2	136.884	28.739	121.248	23.868	15.636	11.42	4.871	20.41
		3	61.219	6.889	67.386	7.952	6.167	10.07	1.063	13.37
		4	67.592	30.515	78.61	47.278	11.018	16.30	16.763	35.46
	5838	1	65.222	22.75	75.225	36.285	10.003	15.34	13.535	37.30
		2	64.849	18.826	71.021	19.878	6.172	9.52	1.052	5.29
		3	53.898	16.856	62.031	17.792	8.133	15.09	0.936	5.26
		4	54.306	20.989	66.285	34.213	11.979	22.06	13.224	38.65
	5841	1	132.25	27.373	116.03	22.296	16.22	12.26	5.077	22.77
		2	128.234	11.769	111.978	6.616	16.256	12.68	5.153	77.89
		3	60.383	-7.763	65.685	-6.837	5.302	8.78	0.926	13.54
		4	64.517	7.854	69.896	8.712	5.379	8.34	0.858	9.85
5845	1	59.786	-9.035	64.204	-7.907	4.418	7.39	1.128	14.27	
	2	69.11	20.62	72.745	19.125	3.635	5.26	1.495	7.82	
	3	61.648	19.361	66.797	17.996	5.149	8.35	1.365	7.59	
	4	52.386	-10.306	58.34	-9.134	5.954	11.37	1.172	12.83	

Tabla 56. Diferencia de esfuerzos en el área de corrosión 5 en los planos x y y debido a la carga permanente vs carga permanente + carga térmica a -10°C.

Área de corrosión	Elemento	Nodo	Dead load		Dead load + temp		σ_x		σ_y	
			σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
5	5005	1	-6.673	-0.775	11.756	-1.249	18.429	276.17	0.474	37.95
		2	-6.655	-0.76	11.998	-0.281	18.653	280.29	0.479	170.46
		3	-3.432	0.317	17.818	1.559	21.25	619.17	1.242	79.67
		4	-3.44	0.282	17.57	0.57	21.01	610.76	0.288	50.53
	5009	1	-8.901	-1.409	9.517	-1.012	18.418	206.92	0.397	39.23
		2	-10.377	-6.376	14.293	15.072	24.67	237.74	21.448	142.30
		3	-5.254	-4.711	25.961	18.698	31.215	594.12	23.409	125.20
		4	-3.765	0.222	21.178	2.577	24.943	662.50	2.355	91.39
	5010	1	-4.387	-1.858	21.537	3.779	25.924	590.93	5.637	149.17
		2	-5.131	-4.321	24.688	14.448	29.819	581.15	18.769	129.91
		3	-0.579	-2.798	26.439	15.129	27.018	4666.32	17.927	118.49
		4	0.172	-0.374	23.282	4.421	23.11	13436.05	4.795	108.46
	5061	1	-8.34	-5.792	17.624	16.043	25.964	311.32	21.835	136.10
		2	-6.946	-1.092	13.235	1.262	20.181	290.54	2.354	186.53
		3	-2.661	0.33	14.2	1.688	16.861	633.63	1.358	80.45
		4	-4.07	-4.343	18.588	16.498	22.658	556.71	20.841	126.32
	5065	1	-6.728	-1.024	12.243	0.975	18.971	281.97	1.999	205.03
		2	-6.613	-0.58	11.662	-1.109	18.275	276.35	0.529	47.70
		3	-3.872	0.341	18.694	1.09	22.566	582.80	0.749	68.72
		4	-4	-0.075	19.279	3.201	23.279	581.98	3.276	102.34

3.3.3 Apoyos

En las figuras 102, 103, 104 y 105 se presentan las diferencias de deformación resultantes del cambio en las condiciones de apoyo del segundo tramo del puente. Estas figuras ilustran las deformaciones en la mitad del segundo tramo, causadas por el tránsito de una locomotora a 70 km/h, coincidiendo con la ubicación de los sensores de deflexión utilizados durante las pruebas de carga.

En primer lugar, las figuras 102 y 103 muestran la variación en la deformación con un solo apoyo dañado. Posteriormente, las figuras 104 y 105 presentan las deformaciones observadas con dos apoyos dañados.

Figura 102. Gráfico deformación vs tiempo del nodo 2972, con y sin daños en un apoyo para el caso ZS4.

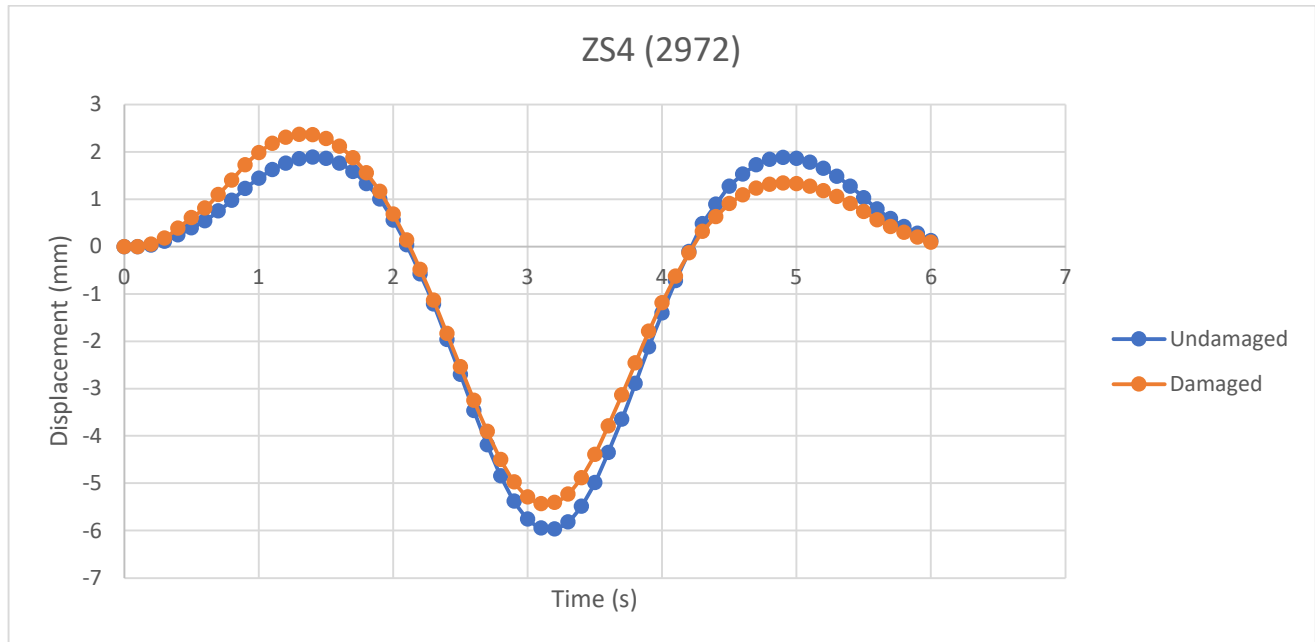


Figura 103. Gráfico deformación vs tiempo del nodo 2973, con y sin daños en un apoyo para el caso ZS4

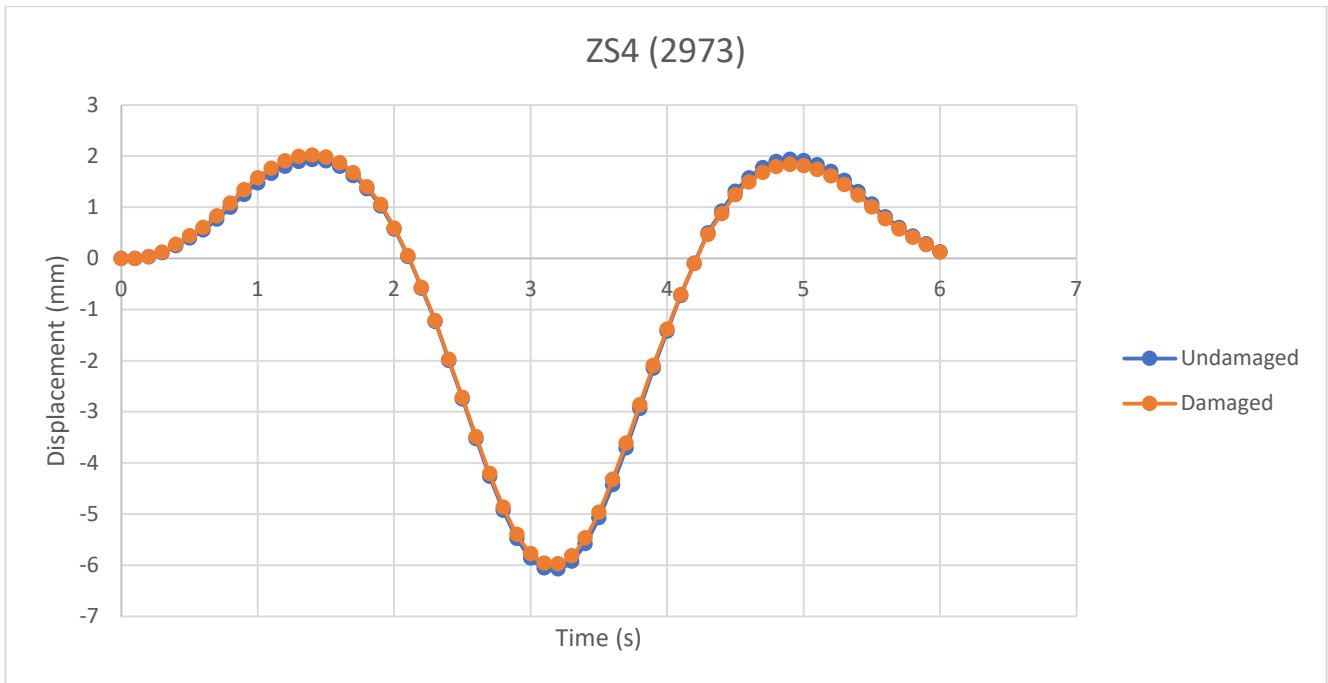


Figura 104. Gráfico deformación vs tiempo del nodo 2972, con y sin daños en ambos apoyos para el caso ZS4

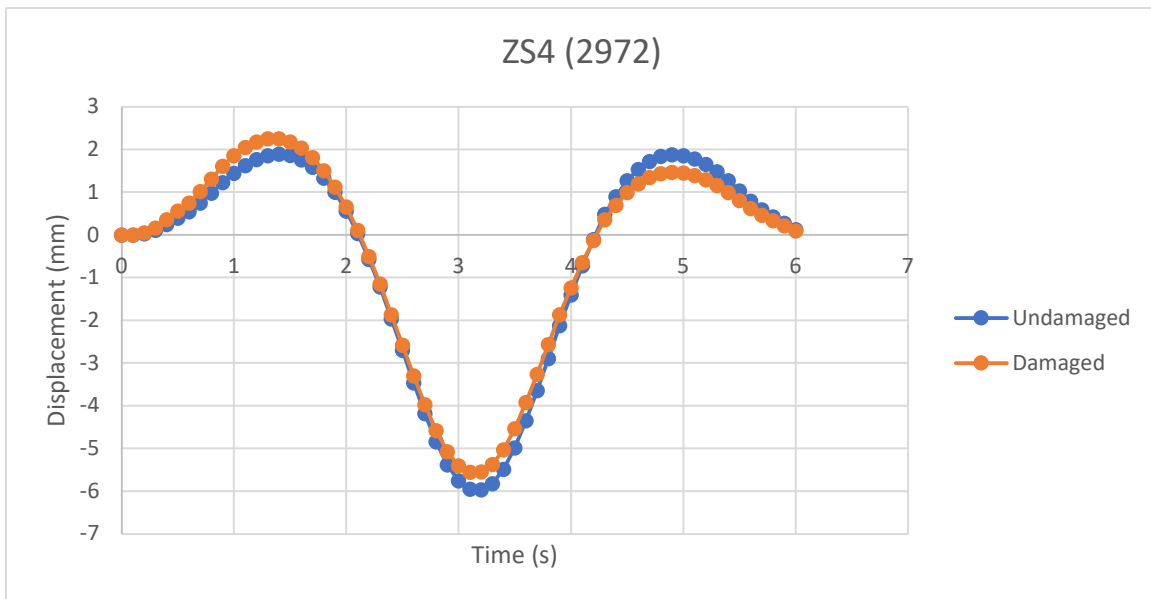
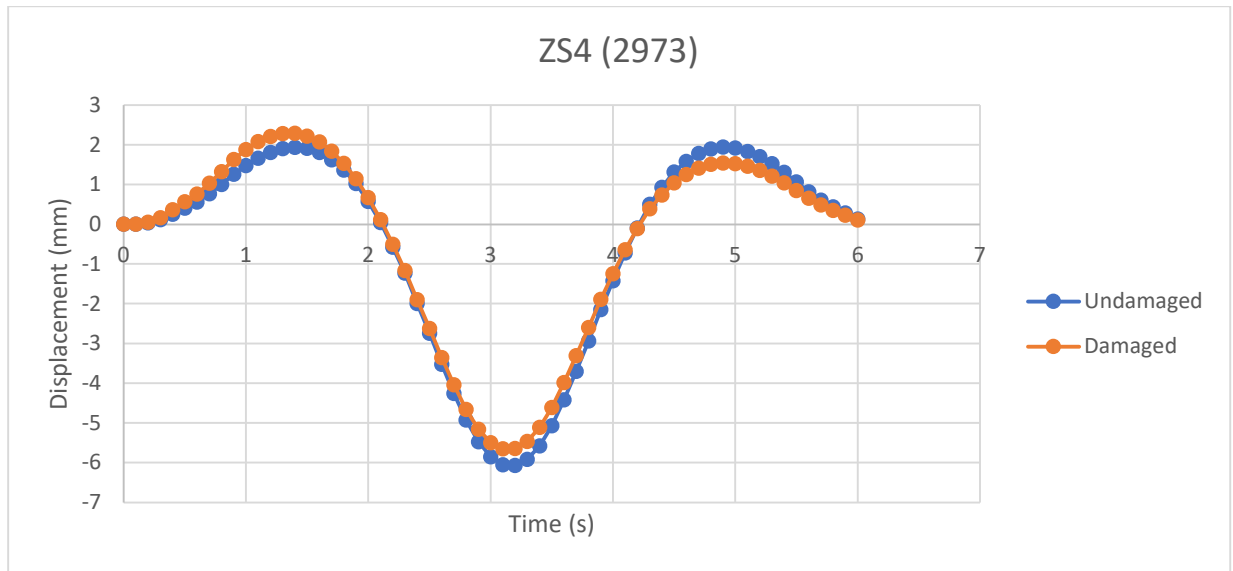


Figura 105. Gráfico deformación vs tiempo del nodo 2973, con y sin daños en ambos apoyos para el caso ZS4



A continuación, se presentan las tablas con la información detallada de dichas figuras, proporcionando un análisis cuantitativo de las variaciones de deformación observadas en los diferentes escenarios de daño para el caso ZS4.

Tabla 57. Diferencia de deformación para los nodos 2972 y 2973 con y sin daños simulados en un apoyo. (Tiempo 0 – 3 s)

Tiempo	Def. sin daños nodo 2972 (mm)	Def. con daños nodo 2972 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)	Def. sin daños nodo 2973 (mm)	Def. con daños nodo 2973 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)
0	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
0.1	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
0.2	0.030845	0.053484	0.022639	73.40	0.03162	0.035856	0.022639	71.60
0.3	0.109271	0.180485	0.071214	65.17	0.111839	0.125163	0.071214	63.68
0.4	0.244316	0.392265	0.147949	60.56	0.249986	0.277668	0.147949	59.18
0.5	0.394254	0.610286	0.216032	54.80	0.403274	0.443694	0.216032	53.57
0.6	0.544753	0.814611	0.269858	49.54	0.55721	0.607702	0.269858	48.43
0.7	0.751499	1.09977	0.348271	46.34	0.768757	0.83392	0.348271	45.30
0.8	0.979533	1.406405	0.426872	43.58	1.002107	1.081976	0.426872	42.60
0.9	1.226408	1.727562	0.501154	40.86	1.254695	1.348463	0.501154	39.94
1	1.444005	1.985605	0.5416	37.51	1.477352	1.578688	0.5416	36.66
1.1	1.625423	2.179132	0.553709	34.07	1.663085	1.766687	0.553709	33.29
1.2	1.764763	2.307721	0.542958	30.77	1.805823	1.907413	0.542958	30.07
1.3	1.855906	2.369966	0.51406	27.70	1.899253	1.995436	0.51406	27.07
1.4	1.891188	2.361503	0.470315	24.87	1.935524	2.023522	0.470315	24.30
1.5	1.862723	2.278897	0.416174	22.34	1.906504	1.984372	0.416174	21.83
1.6	1.762528	2.116397	0.353869	20.08	1.804081	1.870291	0.353869	19.61
1.7	1.58556	1.875171	0.289611	18.27	1.623163	1.677351	0.289611	17.84
1.8	1.330045	1.555776	0.225731	16.97	1.361907	1.404142	0.225731	16.57
1.9	1.001493	1.163842	0.162349	16.21	1.025182	1.055558	0.162349	15.84
2	0.558822	0.686522	0.1277	22.85	0.573764	0.597657	0.1277	22.26
2.1	0.035746	0.137923	0.102177	285.84	0.039817	0.058935	0.102177	256.62
2.2	-0.573647	-0.479042	0.094605	16.49	-0.580991	-0.56329	0.094605	16.28
2.3	-1.21161	-1.128605	0.083005	6.85	-1.232808	-1.217277	0.083005	6.73
2.4	-1.961615	-1.836869	0.124746	6.36	-1.9963	-1.972959	0.124746	6.25
2.5	-2.696922	-2.538314	0.158608	5.88	-2.74653	-2.716854	0.158608	5.77
2.6	-3.463044	-3.243418	0.219626	6.34	-3.526417	-3.485324	0.219626	6.23
2.7	-4.183292	-3.903655	0.279637	6.68	-4.259883	-4.207562	0.279637	6.56
2.8	-4.840869	-4.497146	0.343723	7.10	-4.929265	-4.864953	0.343723	6.97
2.9	-5.376606	-4.970517	0.406089	7.55	-5.474865	-5.398884	0.406089	7.42
3	-5.752273	-5.286875	0.465398	8.09	-5.85771	-5.770632	0.465398	7.95

Tabla 58. Diferencia de deformación para los nodos 2972 y 2973 con y sin daños simulados en un apoyo (tiempo 3.1s – 6s)

Tiempo	Def. sin daños nodo 2972 (mm)	Def. con daños nodo 2972 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)	Def. sin daños nodo 2973 (mm)	Def. con daños nodo 2973 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)
3.1	-5.94493	-5.4274	0.517525	8.71	-6.05464	-5.95781	0.517525	8.55
3.2	-5.96425	-5.40468	0.559566	9.38	-6.07381	-5.96911	0.559566	9.21
3.3	-5.81797	-5.2296	0.588369	10.11	-5.9225	-5.81241	0.588369	9.93
3.4	-5.4818	-4.88131	0.600487	10.95	-5.5781	-5.46575	0.600487	10.77
3.5	-4.98496	-4.39145	0.593517	11.91	-5.0719	-4.96085	0.593517	11.70
3.6	-4.34835	-3.78392	0.564423	12.98	-4.42483	-4.31923	0.564423	12.76
3.7	-3.64319	-3.1314	0.511789	14.05	-3.70464	-3.60888	0.511789	13.81
3.8	-2.89065	-2.45656	0.434085	15.02	-2.93874	-2.85752	0.434085	14.77
3.9	-2.11819	-1.78827	0.329922	15.58	-2.14966	-2.08793	0.329922	15.35
4	-1.40427	-1.1834	0.220873	15.73	-1.4219	-1.38058	0.220873	15.53
4.1	-0.72093	-0.62447	0.096459	13.38	-0.72317	-0.70512	0.096459	13.34
4.2	-0.10287	-0.13181	0.028937	28.13	-0.09361	-0.09902	0.028937	30.91
4.3	0.482302	0.320463	0.161839	33.56	0.502589	0.472308	0.161839	32.20
4.4	0.895716	0.630091	0.265625	29.66	0.92765	0.877951	0.265625	28.63
4.5	1.274858	0.908368	0.36649	28.75	1.316779	1.248207	0.36649	27.83
4.6	1.531186	1.09232	0.438866	28.66	1.580036	1.497922	0.438866	27.78
4.7	1.724461	1.231451	0.49301	28.59	1.777779	1.685534	0.49301	27.73
4.8	1.839672	1.314704	0.524968	28.54	1.895607	1.797383	0.524968	27.69
4.9	1.882092	1.345738	0.536354	28.50	1.938808	1.838454	0.536354	27.66
5	1.859961	1.330426	0.529535	28.47	1.915587	1.816509	0.529535	27.64
5.1	1.780826	1.274189	0.506637	28.45	1.833753	1.738959	0.506637	27.63
5.2	1.652405	1.182563	0.469842	28.43	1.701228	1.613319	0.469842	27.62
5.3	1.481117	1.06016	0.420957	28.42	1.524684	1.445921	0.420957	27.61
5.4	1.272669	0.911079	0.36159	28.41	1.310059	1.242404	0.36159	27.60
5.5	1.033427	0.739892	0.293535	28.40	1.06384	1.008918	0.293535	27.59
5.6	0.793072	0.567847	0.225225	28.40	0.81631	0.774169	0.225225	27.59
5.7	0.590993	0.423194	0.167799	28.39	0.608348	0.576952	0.167799	27.58
5.8	0.425773	0.304899	0.120874	28.39	0.438192	0.415576	0.120874	27.58
5.9	0.278615	0.19954	0.079075	28.38	0.286908	0.272113	0.079075	27.56
6	0.126878	0.090873	0.036005	28.38	0.130684	0.123948	0.036005	27.55

Tabla 59. Diferencia de deformación para los nodos 2972 y 2973 con y sin daños simulados en ambos apoyos (tiempo 0 – 3 s)

Tiempo	Def. sin daños nodo 2972 (mm)	Def. con daños nodo 2972 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)	Def. sin daños nodo 2973 (mm)	Def. con daños nodo 2973 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)
0	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
0.1	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
0.2	0.030845	0.048175	0.01733	56.18	0.03162	0.04855	0.01693	53.54
0.3	0.109271	0.163778	0.054507	49.88	0.111839	0.16511	0.053271	47.63
0.4	0.244316	0.35756	0.113244	46.35	0.249986	0.360647	0.110661	44.27
0.5	0.394254	0.559619	0.165365	41.94	0.403274	0.564838	0.161564	40.06
0.6	0.544753	0.751343	0.20659	37.92	0.55721	0.758974	0.201764	36.21
0.7	0.751499	1.018139	0.26664	35.48	0.768757	1.029098	0.260341	33.87
0.8	0.979533	1.30638	0.326847	33.37	1.002107	1.321135	0.319028	31.84
0.9	1.226408	1.610163	0.383755	31.29	1.254695	1.629164	0.374469	29.85
1	1.444005	1.858781	0.414776	28.72	1.477352	1.881922	0.40457	27.38
1.1	1.625423	2.049539	0.424116	26.09	1.663085	2.07654	0.413455	24.86
1.2	1.764763	2.180721	0.415958	23.57	1.805823	2.211068	0.405245	22.44
1.3	1.855906	2.249808	0.393902	21.22	1.899253	2.282732	0.383479	20.19
1.4	1.891188	2.251657	0.360469	19.06	1.935524	2.286161	0.350637	18.12
1.5	1.862723	2.181782	0.319059	17.13	1.906504	2.21657	0.310066	16.26
1.6	1.762528	2.033905	0.271377	15.40	1.804081	2.067529	0.263448	14.60
1.7	1.58556	1.807734	0.222174	14.01	1.623163	1.838591	0.215428	13.27
1.8	1.330045	1.503276	0.173231	13.02	1.361907	1.529669	0.167762	12.32
1.9	1.001493	1.126058	0.124565	12.44	1.025182	1.145898	0.120716	11.78
2	0.558822	0.656761	0.097939	17.53	0.573764	0.668815	0.095051	16.57
2.1	0.035746	0.113884	0.078138	218.59	0.039817	0.116411	0.076594	192.37
2.2	-0.573647	-0.501527	0.07212	12.57	-0.580991	-0.509528	0.071463	12.30
2.3	-1.21161	-1.148722	0.062888	5.19	-1.232808	-1.169177	0.063631	5.16
2.4	-1.961615	-1.86713	0.094485	4.82	-1.9963	-1.900607	0.095693	4.79
2.5	-2.696922	-2.577	0.119922	4.45	-2.74653	-2.624359	0.122171	4.45
2.6	-3.463044	-3.296878	0.166166	4.80	-3.526417	-3.357503	0.168914	4.79
2.7	-4.183292	-3.971699	0.211593	5.06	-4.259883	-4.044873	0.21501	5.05
2.8	-4.840869	-4.580765	0.260104	5.37	-4.929265	-4.665025	0.26424	5.36
2.9	-5.376606	-5.069318	0.307288	5.72	-5.474865	-5.162658	0.312207	5.70
3	-5.752273	-5.40013	0.352143	6.12	-5.85771	-5.499848	0.357862	6.11

Tabla 60. Diferencia de deformación para los nodos 2972 y 2973 con y sin daños simulados en ambos apoyos (tiempo 3.1s – 6s)

Tiempo	Def. sin daños nodo 2972 (mm)	Def. con daños nodo 2972 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)	Def. sin daños nodo 2973 (mm)	Def. con daños nodo 2973 (mm)	Dif. absoluta (mm)	Error relativo (%)
3.1	-5.944928	-5.553386	0.391542	6.59	-6.054641	-5.65659	0.398051	6.57
3.2	-5.964246	-5.540959	0.423287	7.10	-6.07381	-5.643279	0.430531	7.09
3.3	-5.817971	-5.372907	0.445064	7.65	-5.922496	-5.469778	0.452718	7.64
3.4	-5.481796	-5.027606	0.45419	8.29	-5.578101	-5.115958	0.462143	8.28
3.5	-4.984962	-4.536108	0.448854	9.00	-5.071895	-4.614952	0.456943	9.01
3.6	-4.348345	-3.921597	0.426748	9.81	-4.424833	-3.990033	0.4348	9.83
3.7	-3.643186	-3.256259	0.386927	10.62	-3.704636	-3.310307	0.394329	10.64
3.8	-2.890648	-2.562478	0.32817	11.35	-2.938738	-2.60423	0.334508	11.38
3.9	-2.118188	-1.868768	0.24942	11.78	-2.149658	-1.895423	0.254235	11.83
4	-1.404274	-1.237475	0.166799	11.88	-1.421904	-1.251209	0.170695	12.00
4.1	-0.720933	-0.64877	0.072163	10.01	-0.72317	-0.646982	0.076188	10.54
4.2	-0.102872	-0.126486	0.023614	22.95	-0.093606	-0.111674	0.018068	19.30
4.3	0.482302	0.357257	0.125045	25.93	0.502589	0.384376	0.118213	23.52
4.4	0.895716	0.691911	0.203805	22.75	0.92765	0.730191	0.197459	21.29
4.5	1.274858	0.993901	0.280957	22.04	1.316779	1.043712	0.273067	20.74
4.6	1.531186	1.194513	0.336673	21.99	1.580036	1.253604	0.326432	20.66
4.7	1.724461	1.345956	0.378505	21.95	1.777779	1.411778	0.366001	20.59
4.8	1.839672	1.436466	0.403206	21.92	1.895607	1.506268	0.389339	20.54
4.9	1.882092	1.470048	0.412044	21.89	1.938808	1.541235	0.397573	20.51
5	1.859961	1.453077	0.406884	21.88	1.915587	1.523251	0.392336	20.48
5.1	1.780826	1.391481	0.389345	21.86	1.833753	1.458514	0.375239	20.46
5.2	1.652405	1.29129	0.361115	21.85	1.701228	1.353354	0.347874	20.45
5.3	1.481117	1.157542	0.323575	21.85	1.524684	1.213082	0.311602	20.44
5.4	1.272669	0.994723	0.277946	21.84	1.310059	1.042414	0.267645	20.43
5.5	1.033427	0.807807	0.22562	21.83	1.06384	0.846535	0.217305	20.43
5.6	0.793072	0.619938	0.173134	21.83	0.81631	0.649622	0.166688	20.42
5.7	0.590993	0.462012	0.128981	21.82	0.608348	0.484138	0.12421	20.42
5.8	0.425773	0.332845	0.092928	21.83	0.438192	0.348758	0.089434	20.41
5.9	0.278615	0.217858	0.060757	21.81	0.286908	0.228316	0.058592	20.42
6	0.126878	0.09922	0.027658	21.80	0.130684	0.10399	0.026694	20.43

A continuación, se presenta la variación de esfuerzos en el plano X para cada caso de carga, comparando escenarios sin daños (visualizado en la parte superior de las figuras) con escenarios donde uno o ambos soportes presentan daños (visualizado en la parte inferior). La escala de colores, expresada en megapascales (MPa), facilita la identificación de las diferencias entre ambos escenarios.

Figura 106. Diferencia de esfuerzos en el plano X en el segundo tramo debido a la carga permanente + carga térmica uniforme de 28°C, comparando el escenario sin daños con el escenario donde un soporte presenta daño.

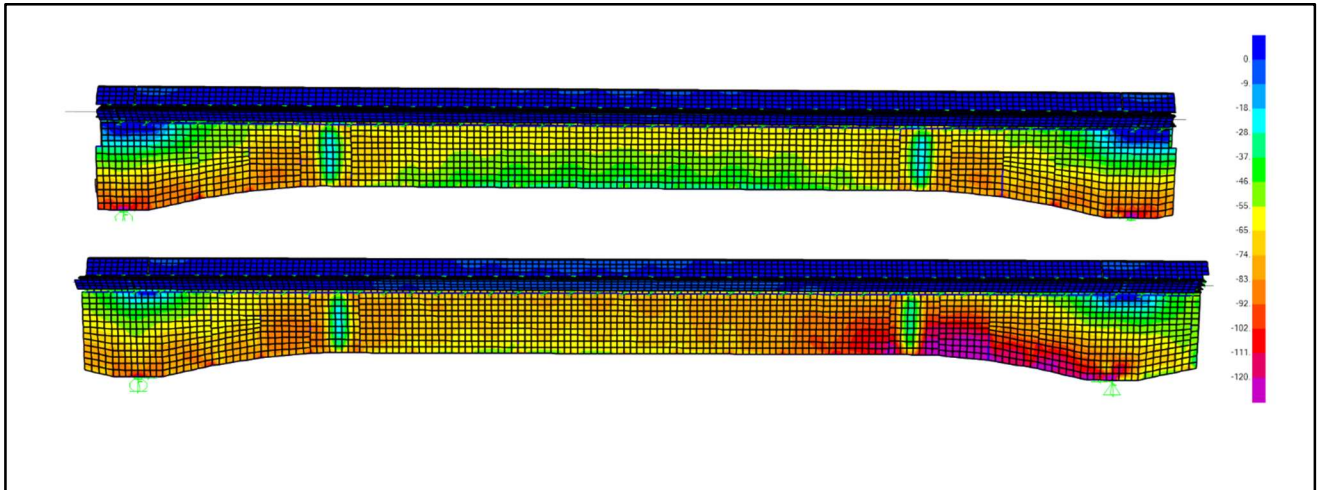


Figura 107. Diferencia de esfuerzos en el plano X debido en el segundo tramo debido a la carga permanente + carga térmica uniforme de 28°C, comparando el escenario sin daños con el escenario donde ambos soportes presenta daño.

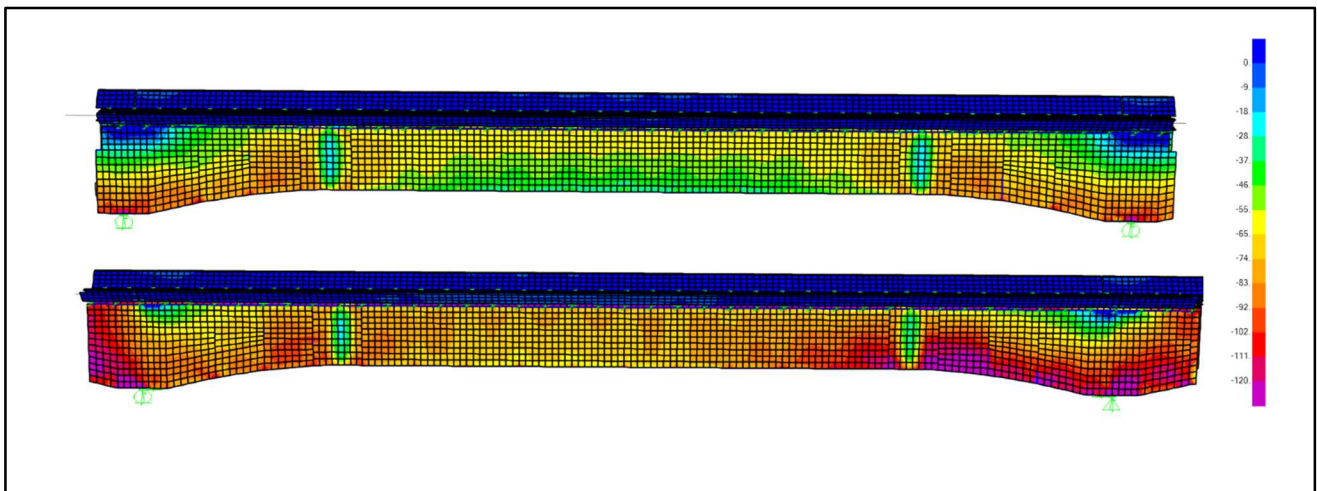


Figura 108. Diferencia de esfuerzos mínimos en el segundo tramo debido a la carga permanente + carga de viento, comparando el escenario sin daños con el escenario donde un soporte presenta daño.

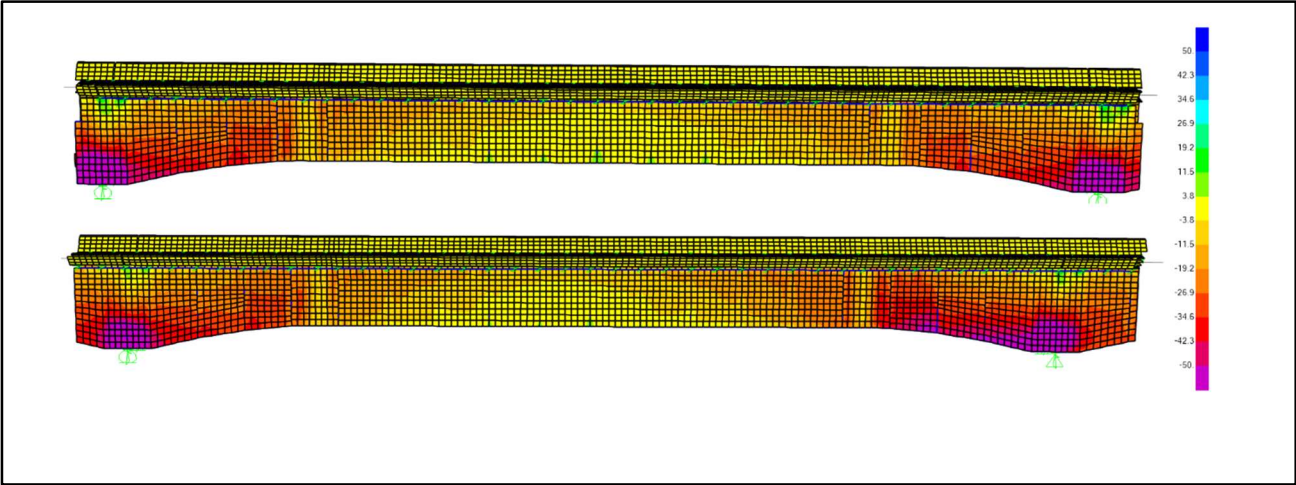
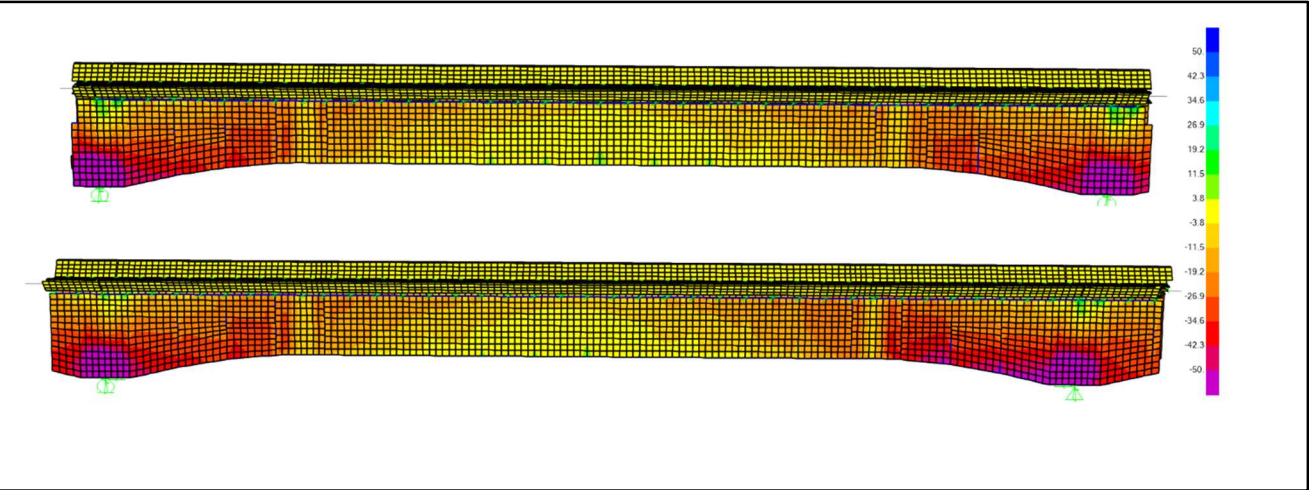
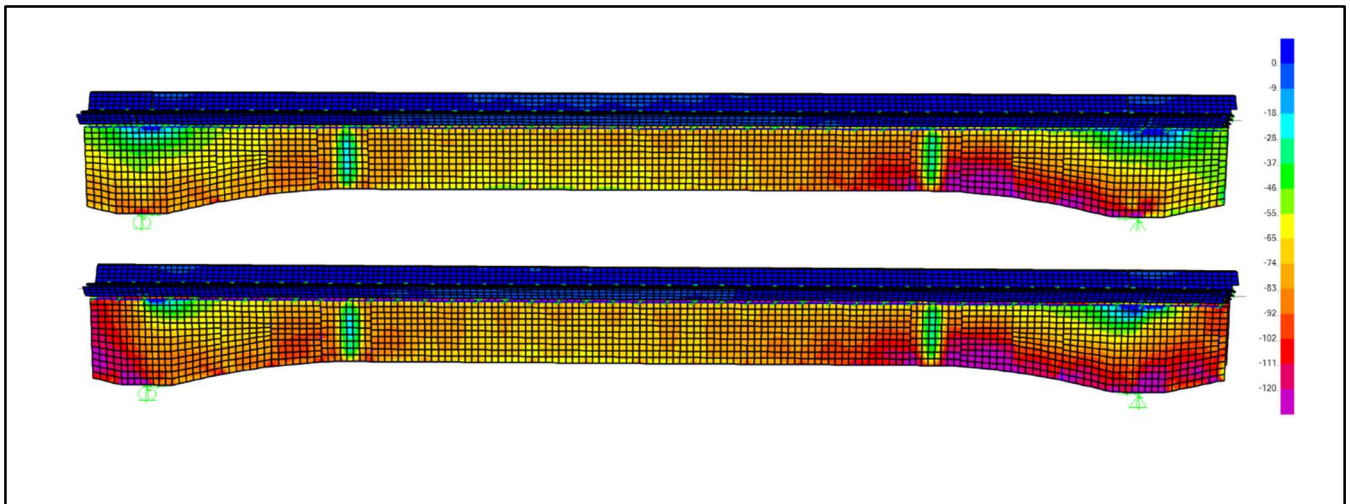


Figura 109. Diferencia de esfuerzos mínimos en el segundo tramo debido a la carga permanente + carga de viento, comparando el escenario sin daños con el escenario donde ambos soportes presenta daño.



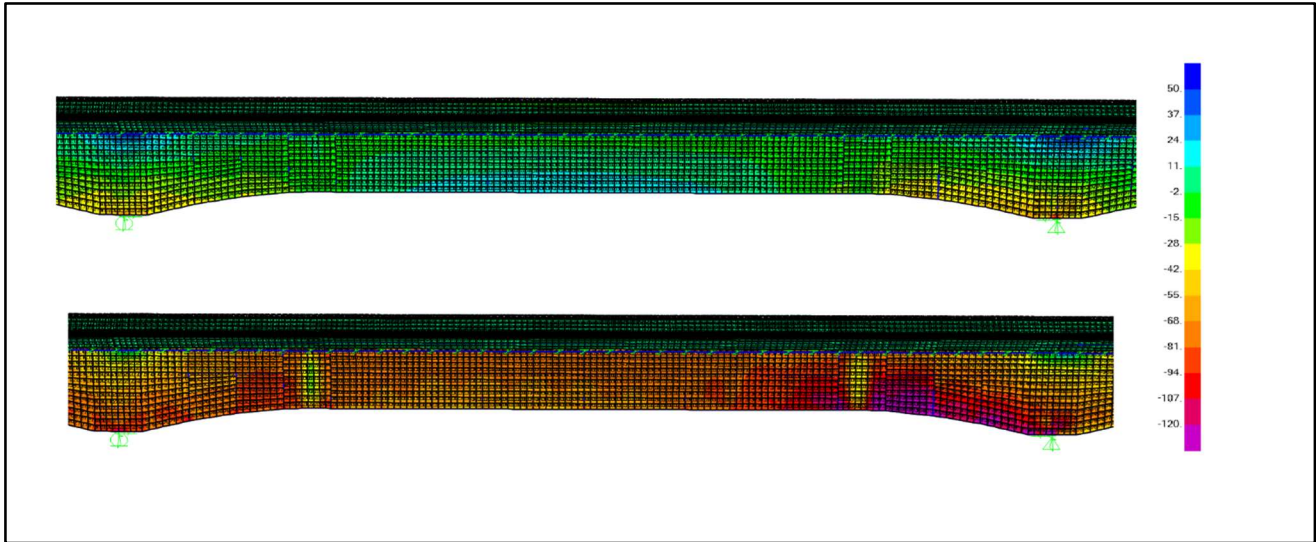
Por otro lado, la figura 110 presenta la variación de esfuerzos que se produce al comparar un escenario con un soporte dañado (parte superior de la imagen) frente a un escenario con ambos soportes dañados (parte inferior).

Figura 110. Diferencia de esfuerzos en X debido a la carga permanente + carga térmica uniforme de 28°C en el segundo tramo, comparando el escenario con un apoyo dañado frente al escenario con ambos apoyos dañados.



De la misma manera, en la figura 111 se puede visualizar el cambio que ocurre en los esfuerzos debido a la carga permanente al agregar la carga térmica, en la parte superior de la figura se muestran los esfuerzos del segundo tramo únicamente bajo la carga permanente y en la parte inferior al agregar una carga térmica de 28°C.

Figura 111. Comparación de esfuerzos en el plano X producidos por la carga permanente vs carga permanente + carga térmica a 28°C en el segundo tramo, para el escenario con un apoyo dañado.



A continuación, se analizan las diferencias de esfuerzos en las áreas adyacentes al soporte, identificadas en la Figura 112. Las tablas subsiguientes detallan los valores de esfuerzo para distintos casos de carga, comparando únicamente los escenarios sin daños y con un soporte dañado.

Figura 112. Área en análisis de la viga principal derecha.

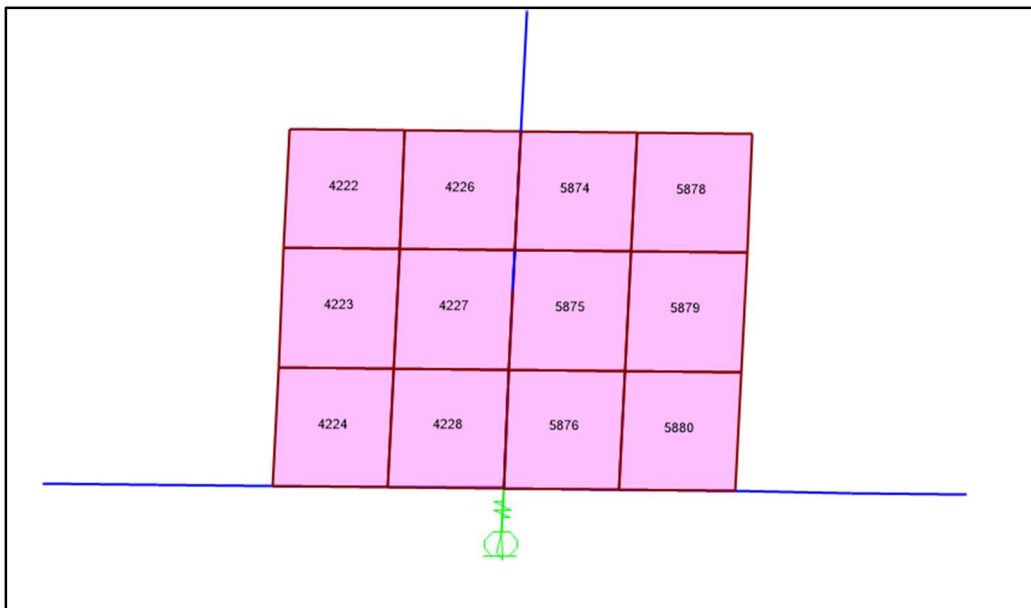


Tabla 61. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos del área en análisis debido a la carga permanente.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4222	1	18.376	-64.573	20.288	-70.593	1.912	10.4	6.02	9.3
	2	7.215	-78.08	5.974	-81.85	1.241	17.2	3.77	4.8
	3	2.848	-81.912	8.252	-83.962	5.404	189.7	2.05	2.5
	4	14.707	-69.35	22.853	-73.283	8.146	55.4	3.933	5.7
4223	1	19.455	-56.377	29.3	-58.593	9.845	50.6	2.216	3.9
	2	22.806	-90.444	34.591	-104.479	11.785	51.7	14.035	15.5
	3	9.306	-109.962	15.63	-135.085	6.324	68.0	25.123	22.8
	4	8.57	-78.457	14.108	-92.894	5.538	64.6	14.437	18.4
4224	1	19.578	-95.027	32.846	-117.956	13.268	67.8	22.929	24.1
	2	13.011	-78.777	23.95	-94.44	10.939	84.1	15.663	19.9
	3	31.542	-12.433	45.53	-18.072	13.988	44.3	5.639	45.4
	4	39.369	-29.997	55.871	-43.093	16.502	41.9	13.096	43.7
4226	1	22.68	-70.286	18.61	-74.992	4.07	17.9	4.706	6.7
	2	-20.931	-99.945	-24.415	-99.803	3.484	16.6	0.142	0.1
	3	-13.298	-114.012	2.768	-107.849	16.066	120.8	6.163	5.4
	4	37.663	-92.028	52.815	-90.445	15.152	40.2	1.583	1.7
4227	1	56.616	-100.737	77.863	-111.011	21.247	37.5	10.274	10.2
	2	5.12	-83.892	20.872	-76.656	15.752	307.7	7.236	8.6
	3	-8.077	-94.543	8.218	-95.468	16.295	201.7	0.925	1.0
	4	45.134	-113.062	67.862	-132.425	22.728	50.4	19.363	17.1
4228	1	45.951	-79.054	72.342	-87.943	26.391	57.4	8.889	11.2
	2	24.343	-63.433	43.869	-65.64	19.526	80.2	2.207	3.5
	3	-24.117	-160.401	-33.296	-216.504	9.179	38.1	56.103	35.0
	4	-4.767	-173.807	-8.358	-235.319	3.591	75.3	61.512	35.4
5874	1	-21.384	-99.347	-19.486	-105.758	1.898	8.9	6.411	6.5
	2	22.103	-69.355	25.003	-68.056	2.9	13.1	1.299	1.9
	3	28.848	-87.86	17.332	-95.497	11.516	39.9	7.637	8.7
	4	-21.952	-110.313	-36.762	-123.36	14.81	67.5	13.047	11.8
5875	1	-3.702	-80.489	-17.073	-94.409	13.371	361.2	13.92	17.3
	2	36.719	-86.867	23.903	-86.143	12.816	34.9	0.724	0.8
	3	32.122	-111.171	14.678	-97.44	17.444	54.3	13.731	12.4
	4	-10.552	-102.72	-28.052	-104.219	17.5	165.8	1.499	1.5
5876	1	21.774	-72.186	3.731	-71.455	18.043	82.9	0.731	1.0
	2	53.674	-114.141	22.622	-96.133	31.052	57.9	18.008	15.8
	3	13.405	-117.504	7.658	-78.286	5.747	42.9	39.218	33.4
	4	-13.413	-80.751	-9.363	-55.685	4.05	30.2	25.066	31.0
5878	1	3.92	-78.254	3.928	-78.524	0.008	0.2	0.27	0.3
	2	12.096	-59.969	10.482	-58.765	1.614	13.3	1.204	2.0
	3	7.624	-65.179	1.506	-66.165	6.118	80.2	0.986	1.5
	4	-1.557	-82.353	-6.93	-83.932	5.373	345.1	1.579	1.9
5879	1	7.044	-81.863	0.646	-75.346	6.398	90.8	6.517	8.0
	2	13.524	-62.577	4.947	-61.328	8.577	63.4	1.249	2.0
	3	11.487	-74.431	3.096	-63.697	8.391	73.0	10.734	14.4
	4	4.301	-93.224	-1.554	-77.634	5.855	136.1	15.59	16.7
5880	1	25.488	-97.01	5.659	-77.053	19.829	77.8	19.957	20.6
	2	27.716	-72.388	11.107	-60.634	16.609	59.9	11.754	16.2
	3	5.029	-70.174	4.072	-44.874	0.957	19.0	25.3	36.1
	4	-1.015	-91.185	-3.349	-59.566	2.334	230.0	31.619	34.7

Tabla 62. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y del área en análisis debido a la combinación de carga permanente

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4222	1	-28,839	-17,358	-28,901	-21,404	0,062	0,2	4,046	23,3
	2	-32,185	-38,68	-31,869	-44,006	0,316	1,0	5,326	13,8
	3	-40,371	-38,693	-33,974	-41,736	6,397	15,8	3,043	7,9
	4	-36,917	-17,726	-30,878	-19,552	6,039	16,4	1,826	10,3
4223	1	-33,004	-3,918	-26,194	-3,099	6,81	20,6	0,819	20,9
	2	-37,525	-30,113	-32,366	-37,522	5,159	13,7	7,409	24,6
	3	-62,744	-37,911	-70,267	-49,188	7,523	12,0	11,277	29,7
	4	-58,109	-11,778	-63,962	-14,825	5,853	10,1	3,047	25,9
4224	1	-59,365	-16,084	-65,362	-19,748	5,997	10,1	3,664	22,8
	2	-54,729	-11,037	-59,016	-11,473	4,287	7,8	0,436	4,0
	3	10,75	8,359	16,516	10,941	5,766	53,6	2,582	30,9
	4	6,149	3,224	10,211	2,567	4,062	66,1	0,657	20,4
4226	1	-13,96	-33,647	-16,482	-39,899	2,522	18,1	6,252	18,6
	2	-28,303	-92,573	-28,931	-95,287	0,628	2,2	2,714	2,9
	3	-36,138	-91,172	-17,615	-87,466	18,523	51,3	3,706	4,1
	4	-21,708	-32,656	-5,076	-32,554	16,632	76,6	0,102	0,3
4227	1	-19,458	-24,662	-4,145	-29,004	15,313	78,7	4,342	17,6
	2	-24,771	-54,001	-6,044	-49,74	18,727	75,6	4,261	7,9
	3	-42,997	-59,623	-30,059	-57,191	12,938	30,1	2,432	4,1
	4	-37,546	-30,383	-28,003	-36,561	9,543	25,4	6,178	20,3
4228	1	-29,555	-3,548	-16,744	1,143	12,811	43,3	4,691	132,2
	2	-28,344	-10,745	-14,959	-6,811	13,385	47,2	3,934	36,6
	3	-140,191	-44,328	-190,365	-59,436	50,174	35,8	15,108	34,1
	4	-141,365	-37,209	-192,103	-51,574	50,738	35,9	14,365	38,6
5874	1	-28,141	-92,59	-29,632	-95,612	1,491	5,3	3,022	3,3
	2	-13,004	-34,248	-12,739	-30,314	0,265	2,0	3,934	11,5
	3	-24,648	-34,364	-42,846	-35,319	18,198	73,8	0,955	2,8
	4	-40,001	-92,265	-60,066	-100,056	20,065	50,2	7,791	8,4
5875	1	-28,878	-55,313	-48,822	-62,66	19,944	69,1	7,347	13,3
	2	-22,617	-27,532	-39,197	-23,043	16,58	73,3	4,489	16,3
	3	-44,71	-34,339	-54,786	-27,976	10,076	22,5	6,363	18,5
	4	-51,268	-62,004	-64,853	-67,418	13,585	26,5	5,414	8,7
5876	1	-36,963	-13,45	-50,202	-17,522	13,239	35,8	4,072	30,3
	2	-40,218	-20,249	-52,409	-21,103	12,191	30,3	0,854	4,2
	3	-73,759	-30,34	-50,146	-20,482	23,613	32,0	9,858	32,5
	4	-70,773	-23,39	-48,35	-16,698	22,423	31,7	6,692	28,6
5878	1	-34,066	-40,268	-37,276	-37,319	3,21	9,4	2,949	7,3
	2	-29,665	-18,208	-33,124	-15,159	3,459	11,7	3,049	16,7
	3	-38,91	-18,644	-47,821	-16,838	8,911	22,9	1,806	9,7
	4	-43,566	-40,344	-52,333	-38,529	8,767	20,1	1,815	4,5
5879	1	-41,439	-33,38	-48,591	-26,108	7,152	17,3	7,272	21,8
	2	-36,962	-12,091	-45,929	-10,452	8,967	24,3	1,639	13,6
	3	-47,676	-15,268	-49,145	-11,455	1,469	3,1	3,813	25,0
	4	-52,459	-36,464	-52,225	-26,963	0,234	0,4	9,501	26,1
5880	1	-48,597	-22,925	-50,628	-20,767	2,031	4,2	2,158	9,4
	2	-43,298	-1,374	-46,392	-3,135	3,094	7,1	1,761	128,2
	3	-59,139	-6,006	-39,728	-1,074	19,411	32,8	4,932	82,1
	4	-64,732	-27,468	-44,367	-18,548	20,365	31,5	8,92	32,5

Tabla 63. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos en el área de análisis debido a la carga permanente + carga térmica uniforme de 28°C.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4222	1	-9.161	-109.95	-4.581	-126.316	4.58	50.0	16.366	14.9
	2	-28.147	-123.935	-32.442	-134.017	4.295	15.3	10.082	8.1
	3	-33.613	-134.238	-19.157	-139.072	14.456	43.0	4.834	3.6
	4	-13.644	-121.382	8.483	-131.423	22.127	162.2	10.041	8.3
4223	1	3.151	-98.163	28.487	-101.612	25.336	804.1	3.449	3.5
	2	-0.284	-145.927	32.326	-184.994	32.61	11482.4	39.067	26.8
	3	-20.733	-183.407	-4.155	-253.922	16.578	80.0	70.515	38.4
	4	-12.398	-140.405	1.026	-179.362	13.424	108.3	38.957	27.7
4224	1	4.955	-157.047	40.317	-220.127	35.362	713.7	63.08	40.2
	2	9.558	-140.196	38.519	-182.709	28.961	303.0	42.513	30.3
	3	24.162	-19.98	60.647	-32.512	36.485	151.0	12.532	62.7
	4	21.031	-38.357	66.426	-73.979	45.395	215.8	35.622	92.9
4226	1	-14.256	-114.468	-26.544	-127.357	12.288	86.2	12.889	11.3
	2	-64.111	-137.47	-74.359	-136.811	10.248	16.0	0.659	0.5
	3	-49.316	-156.119	-3.852	-137.807	45.464	92.2	18.312	11.7
	4	6.099	-138.877	49.623	-134.386	43.524	713.6	4.491	3.2
4227	1	38.56	-150.082	99.029	-179.072	60.469	156.8	28.99	19.3
	2	-47.712	-152.704	0.127	-134.588	47.839	100.3	18.116	11.9
	3	-49.466	-166.708	-1.635	-170.442	47.831	96.7	3.734	2.2
	4	38.877	-166.027	104.28	-221.776	65.403	168.2	55.749	33.6
4228	1	60.796	-114.172	135.263	-138.424	74.467	122.5	24.252	21.2
	2	-30.774	-144.37	29.283	-154.737	60.057	195.2	10.367	7.2
	3	-90.532	-292.547	-119.086	-451.295	28.554	31.5	158.748	54.3
	4	11.82	-273.184	1.471	-449.62	10.349	87.6	176.436	64.6
5874	1	-66.025	-135.5	-58.526	-155.948	7.499	11.4	20.448	15.1
	2	-17.241	-111.514	-7.911	-108.798	9.33	54.1	2.716	2.4
	3	-8.372	-130.842	-35.769	-158.397	27.397	327.2	27.555	21.1
	4	-63.23	-148.652	-100.748	-191.055	37.518	59.3	42.403	28.5
5875	1	-61.051	-146.281	-99.399	-186.232	38.348	62.8	39.951	27.3
	2	6.96	-129.571	-19.942	-137.361	26.902	386.5	7.79	6.0
	3	18.313	-161.92	-24.497	-129.762	42.81	233.8	32.158	19.9
	4	-53.304	-175.297	-104.381	-178.728	51.077	95.8	3.431	2.0
5876	1	-35.133	-153.153	-91.776	-146.179	56.643	161.2	6.974	4.6
	2	61.854	-165.564	-18.466	-122.669	80.32	129.9	42.895	25.9
	3	18.603	-194.796	2.48	-82.642	16.123	86.7	112.154	57.6
	4	-81.698	-179.166	-61.898	-115.431	19.8	24.2	63.735	35.6
5878	1	-34.344	-122.789	-32.446	-125.437	1.898	5.5	2.648	2.2
	2	-19.302	-102.65	-20.65	-102.476	1.348	7.0	0.174	0.2
	3	-23.7	-114.977	-34.398	-124.664	10.698	45.1	9.687	8.4
	4	-40.163	-133.705	-50.972	-142.844	10.809	26.9	9.139	6.8
5879	1	-24.067	-133.864	-32.754	-124.833	8.687	36.1	9.031	6.7
	2	-5.072	-105.588	-18.247	-113.437	13.175	259.8	7.849	7.4
	3	-11.016	-132.918	-21.828	-115.384	10.812	98.1	17.534	13.2
	4	-31.542	-159.976	-37.846	-125.741	6.304	20.0	34.235	21.4
5880	1	12.098	-165.353	-31.772	-121.117	43.87	362.6	44.236	26.8
	2	21.05	-121.785	-6.546	-108.119	27.596	131.1	13.666	11.2
	3	1.806	-109.459	12.752	-50.563	10.946	606.1	58.896	53.8
	4	-16.453	-143.981	-17.891	-58.523	1.438	8.7	85.458	59.4

Tabla 64. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y en el área de análisis debido a la combinación de carga permanente + carga térmica uniforme de 28°C.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4222	1	-74,78	-44,331	-74,957	-55,94	0,177	0,2	11,609	26,2
	2	-79,303	-72,78	-78,398	-88,061	0,905	1,1	15,281	21,0
	3	-92,786	-75,065	-74,433	-83,795	18,353	19,8	8,73	11,6
	4	-88,104	-46,923	-70,778	-52,162	17,326	19,7	5,239	11,2
4223	1	-78,962	-16,049	-59,423	-13,701	19,539	24,7	2,348	14,6
	2	-87,654	-58,557	-72,854	-79,815	14,8	16,9	21,258	36,3
	3	-131,587	-72,553	-153,17	-104,906	21,583	16,4	32,353	44,6
	4	-122,75	-30,053	-139,542	-38,794	16,792	13,7	8,741	29,1
4224	1	-122,503	-29,59	-139,709	-40,101	17,206	14,0	10,511	35,5
	2	-114,706	-15,932	-127,007	-17,183	12,301	10,7	1,251	7,9
	3	-10,768	14,95	5,775	22,359	16,543	153,6	7,409	49,6
	4	-18,518	1,192	-6,862	-0,692	11,656	62,9	1,884	158,1
4226	1	-61,114	-67,61	-68,352	-85,549	7,238	11,8	17,939	26,5
	2	-74,577	-127,004	-76,38	-134,789	1,803	2,4	7,785	6,1
	3	-79,628	-125,807	-26,485	-115,175	53,143	66,7	10,632	8,5
	4	-66,03	-66,748	-18,311	-66,452	47,719	72,3	0,296	0,4
4227	1	-61,083	-50,44	-17,146	-62,896	43,937	71,9	12,456	24,7
	2	-78,434	-121,981	-24,705	-109,756	53,729	68,5	12,225	10,0
	3	-89,785	-126,389	-52,667	-119,411	37,118	41,3	6,978	5,5
	4	-72,253	-54,897	-44,873	-72,624	27,38	37,9	17,727	32,3
4228	1	-55,223	1,847	-18,467	15,306	36,756	66,6	13,459	728,7
	2	-80,38	-94,763	-41,978	-83,476	38,402	47,8	11,287	11,9
	3	-240,291	-142,789	-384,246	-186,135	143,955	59,9	43,346	30,4
	4	-215,094	-46,27	-360,665	-87,484	145,571	67,7	41,214	89,1
5874	1	-74,484	-127,042	-78,762	-135,712	4,278	5,7	8,67	6,8
	2	-60,185	-68,571	-59,425	-57,285	0,76	1,3	11,286	16,5
	3	-70,088	-69,125	-122,298	-71,868	52,21	74,5	2,743	4,0
	4	-84,637	-127,245	-142,205	-149,597	57,568	68,0	22,352	17,6
5875	1	-83,692	-123,64	-140,912	-144,719	57,22	68,4	21,079	17,0
	2	-66,13	-56,481	-113,699	-43,604	47,569	71,9	12,877	22,8
	3	-81,547	-62,061	-110,455	-43,805	28,908	35,4	18,256	29,4
	4	-99,429	-129,171	-138,405	-144,705	38,976	39,2	15,534	12,0
5876	1	-90,394	-97,892	-128,378	-109,577	37,984	42,0	11,685	11,9
	2	-72,065	-31,645	-107,041	-34,094	34,976	48,5	2,449	7,7
	3	-127,78	-48,414	-60,032	-20,129	67,748	53,0	28,285	58,4
	4	-146,371	-114,493	-82,037	-95,292	64,334	44,0	19,201	16,8
5878	1	-82,12	-75,014	-91,33	-66,553	9,21	11,2	8,461	11,3
	2	-76,36	-45,591	-86,284	-36,843	9,924	13,0	8,748	19,2
	3	-90,579	-48,097	-116,146	-42,916	25,567	28,2	5,181	10,8
	4	-96,636	-77,233	-121,79	-72,026	25,154	26,0	5,207	6,7
5879	1	-93,041	-64,89	-113,562	-44,026	20,521	22,1	20,864	32,2
	2	-84,009	-26,651	-109,735	-21,949	25,726	30,6	4,702	17,6
	3	-109,281	-34,653	-113,497	-23,715	4,216	3,9	10,938	31,6
	4	-118,655	-72,863	-117,981	-45,606	0,674	0,6	27,257	37,4
5880	1	-110,037	-43,219	-115,862	-37,026	5,825	5,3	6,193	14,3
	2	-99,091	-1,644	-107,968	-6,697	8,877	9,0	5,053	307,4
	3	-104,515	-3,138	-48,824	11,013	55,691	53,3	14,151	451,0
	4	-115,792	-44,641	-57,363	-19,051	58,429	50,5	25,59	57,3

Tabla 65. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos en el área de análisis debido a la carga permanente + carga de viento.

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4222	1	19.302	-62.784	21.254	-68.973	1.952	10.1	6.189	9.9
	2	6.448	-77.399	5.087	-81.206	1.361	21.1	3.807	4.9
	3	1.12	-82.897	6.642	-84.959	5.522	493.0	2.062	2.5
	4	14.559	-68.933	22.996	-73.026	8.437	58.0	4.093	5.9
4223	1	20.185	-55.575	30.355	-57.877	10.17	50.4	2.302	4.1
	2	21.284	-90.455	33.339	-104.832	12.055	56.6	14.377	15.9
	3	8.444	-109.871	14.913	-135.73	6.469	76.6	25.859	23.5
	4	9.701	-77.321	15.447	-92.246	5.746	59.2	14.925	19.3
4224	1	20.207	-93.381	33.907	-117.046	13.7	67.8	23.665	25.3
	2	12.899	-79.507	24.134	-95.615	11.235	87.1	16.108	20.3
	3	29.955	-14.327	44.323	-20.084	14.368	48.0	5.757	40.2
	4	38.933	-29.935	55.938	-43.427	17.005	43.7	13.492	45.1
4226	1	22.353	-68.704	18.113	-73.515	4.24	19.0	4.811	7.0
	2	-24.267	-97.81	-28.005	-97.519	3.738	15.4	0.291	0.3
	3	-17.306	-114.637	-0.818	-108.198	16.488	95.3	6.439	5.6
	4	35.589	-91.901	51.234	-90.284	15.645	44.0	1.617	1.8
4227	1	55.268	-99.273	77.152	-109.84	21.884	39.6	10.567	10.6
	2	1.599	-84.186	17.651	-76.528	16.052	1003.9	7.658	9.1
	3	-10.629	-94.542	6.081	-95.4	16.71	157.2	0.858	0.9
	4	44.432	-111.032	67.87	-131	23.438	52.8	19.968	18.0
4228	1	45.757	-77.692	72.96	-86.843	27.203	59.5	9.151	11.8
	2	21.498	-64.491	41.469	-66.599	19.971	92.9	2.108	3.3
	3	-24.595	-159.331	-34.053	-217.208	9.458	38.5	57.877	36.3
	4	-3.12	-169.809	-6.826	-233.252	3.706	118.8	63.443	37.4
5874	1	-24.146	-96.792	-22.059	-103.534	2.087	8.6	6.742	7.0
	2	21.019	-67.37	24.063	-66.083	3.044	14.5	1.287	1.9
	3	26.031	-87.697	14.23	-95.651	11.801	45.3	7.954	9.1
	4	-25.496	-110.676	-40.629	-124.274	15.133	59.4	13.598	12.3
5875	1	-6.699	-80.26	-20.204	-94.903	13.505	201.6	14.643	18.2
	2	34.832	-85.876	21.822	-85.338	13.01	37.4	0.538	0.6
	3	30.502	-109.467	12.67	-95.465	17.832	58.5	14.002	12.8
	4	-12.856	-102.032	-30.795	-103.69	17.939	139.5	1.658	1.6
5876	1	19.325	-72.23	1.026	-71.787	18.299	94.7	0.443	0.6
	2	52.12	-112.101	20.292	-93.728	31.828	61.1	18.373	16.4
	3	13.704	-115.649	7.784	-75.206	5.92	43.2	40.443	35.0
	4	-13.954	-80.84	-9.789	-54.974	4.165	29.8	25.866	32.0
5878	1	2.958	-76.886	3.074	-77.271	0.116	3.9	0.385	0.5
	2	12.726	-58.038	11.142	-56.876	1.584	12.4	1.162	2.0
	3	7.167	-64.714	0.886	-65.761	6.281	87.6	1.047	1.6
	4	-3.437	-82.72	-8.889	-84.439	5.452	158.6	1.719	2.1
5879	1	5.775	-81.366	-0.56	-74.907	6.335	109.7	6.459	7.9
	2	13.934	-61.611	5.203	-60.439	8.731	62.7	1.172	1.9
	3	12.068	-73.572	3.461	-62.549	8.607	71.3	11.023	15.0
	4	3.346	-92.85	-2.541	-76.922	5.887	175.9	15.928	17.2
5880	1	25.148	-95.941	4.889	-75.551	20.259	80.6	20.39	21.3
	2	27.766	-71.406	10.734	-59.382	17.032	61.3	12.024	16.8
	3	5.066	-69.636	4.106	-43.569	0.96	18.9	26.067	37.4
	4	-1.17	-90.624	-3.53	-58.059	2.36	201.7	32.565	35.9

Tabla 66. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y en el área de análisis debido a la combinación de carga permanente + carga de viento

Elemento	Nodo	Sin daños		Con daños		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4222	1	-27,819	-15,663	-27,883	-19,836	0,064	0,2	4,173	26,6
	2	-33,578	-37,373	-33,253	-42,866	0,325	1,0	5,493	14,7
	3	-42,296	-39,481	-35,698	-42,619	6,598	15,6	3,138	7,9
	4	-36,506	-17,868	-30,278	-19,752	6,228	17,1	1,884	10,5
4223	1	-32,19	-3,2	-25,166	-2,356	7,024	21,8	0,844	26,4
	2	-39,291	-29,881	-33,97	-37,523	5,321	13,5	7,642	25,6
	3	-63,836	-37,591	-71,595	-49,222	7,759	12,2	11,631	30,9
	4	-56,694	-10,925	-62,731	-14,068	6,037	10,6	3,143	28,8
4224	1	-57,958	-15,216	-64,144	-18,995	6,186	10,7	3,779	24,8
	2	-55,827	-10,781	-60,25	-11,231	4,423	7,9	0,45	4,2
	3	7,661	7,966	13,609	10,63	5,948	77,6	2,664	33,4
	4	5,519	3,479	9,71	2,802	4,191	75,9	0,677	19,5
4226	1	-14,57	-31,781	-17,172	-38,23	2,602	17,9	6,449	20,3
	2	-31,898	-90,179	-32,546	-92,978	0,648	2,0	2,799	3,1
	3	-40,142	-91,801	-21,036	-87,979	19,106	47,6	3,822	4,2
	4	-22,795	-33,517	-5,64	-33,41	17,155	75,3	0,107	0,3
4227	1	-19,94	-24,065	-4,145	-28,543	15,795	79,2	4,478	18,6
	2	-28,717	-53,871	-9,401	-49,476	19,316	67,3	4,395	8,2
	3	-45,832	-59,34	-32,487	-56,831	13,345	29,1	2,509	4,2
	4	-37,039	-29,561	-27,195	-35,934	9,844	26,6	6,373	21,6
4228	1	-29,107	-2,828	-15,893	2,01	13,214	45,4	4,838	171,1
	2	-31,468	-11,525	-17,662	-7,468	13,806	43,9	4,057	35,2
	3	-139,779	-44,147	-191,531	-59,73	51,752	37,0	15,583	35,3
	4	-137,433	-35,495	-189,766	-50,312	52,333	38,1	14,817	41,7
5874	1	-31,002	-89,936	-32,54	-93,053	1,538	5,0	3,117	3,5
	2	-13,95	-32,401	-13,677	-28,343	0,273	2,0	4,058	12,5
	3	-26,334	-35,331	-45,103	-36,317	18,769	71,3	0,986	2,8
	4	-43,415	-92,757	-64,111	-100,793	20,696	47,7	8,036	8,7
5875	1	-32,064	-54,894	-52,635	-62,472	20,571	64,2	7,578	13,8
	2	-23,862	-27,182	-40,963	-22,553	17,101	71,7	4,629	17,0
	3	-45,101	-33,864	-55,494	-27,301	10,393	23,0	6,563	19,4
	4	-53,336	-61,553	-67,348	-67,137	14,012	26,3	5,584	9,1
5876	1	-39,068	-13,837	-52,724	-18,037	13,656	35,0	4,2	30,4
	2	-40,681	-19,301	-53,255	-20,182	12,574	30,9	0,881	4,6
	3	-72,853	-29,093	-48,497	-18,924	24,356	33,4	10,169	35,0
	4	-71,235	-23,559	-48,107	-16,656	23,128	32,5	6,903	29,3
5878	1	-35,206	-38,722	-38,517	-35,68	3,311	9,4	3,042	7,9
	2	-28,925	-16,386	-32,492	-13,241	3,567	12,3	3,145	19,2
	3	-38,77	-18,776	-47,961	-16,913	9,191	23,7	1,863	9,9
	4	-45,126	-41,031	-54,169	-39,159	9,043	20,0	1,872	4,6
5879	1	-42,688	-32,903	-50,065	-25,402	7,377	17,3	7,501	22,8
	2	-36,477	-11,2	-45,726	-9,51	9,249	25,4	1,69	15,1
	3	-46,96	-14,545	-48,475	-10,613	1,515	3,2	3,932	27,0
	4	-53,262	-36,242	-53,02	-26,443	0,242	0,5	9,799	27,0
5880	1	-48,988	-21,805	-51,083	-19,579	2,095	4,3	2,226	10,2
	2	-42,786	-0,854	-45,977	-2,67	3,191	7,5	1,816	212,6
	3	-58,759	-5,811	-38,738	-0,724	20,021	34,1	5,087	87,5
	4	-65,056	-26,739	-44,05	-17,539	21,006	32,3	9,2	34,4

Finalmente, las tablas 67 y 68 comparan los esfuerzos producidos por la carga permanente, tanto de forma aislada como en combinación con la carga térmica, en el escenario donde un apoyo presenta daño.

Tabla 67. Diferencia de esfuerzos máximos y mínimos en el área de análisis producidos por la carga permanente vs carga permanente + carga térmica a 28°.

Elemento	Nodo	Dead load		Dead load + temp		Máximos		Mínimos	
		Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Máx (MPa)	Mín (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4222	1	20,288	-70,593	-4,581	-126,316	24,869	122,6	55,723	78,9
	2	5,974	-81,85	-32,442	-134,017	38,416	643,1	52,167	63,7
	3	8,252	-83,962	-19,157	-139,072	27,409	332,1	55,11	65,6
	4	22,853	-73,283	8,483	-131,423	14,37	62,9	58,14	79,3
4223	1	29,3	-58,593	28,487	-101,612	0,813	2,8	43,019	73,4
	2	34,591	-104,479	32,326	-184,994	2,265	6,5	80,515	77,1
	3	15,63	-135,085	-4,155	-253,922	19,785	126,6	118,837	88,0
	4	14,108	-92,894	1,026	-179,362	13,082	92,7	86,468	93,1
4224	1	32,846	-117,956	40,317	-220,127	7,471	22,7	102,171	86,6
	2	23,95	-94,44	38,519	-182,709	14,569	60,8	88,269	93,5
	3	45,53	-18,072	60,647	-32,512	15,117	33,2	14,44	79,9
	4	55,871	-43,093	66,426	-73,979	10,555	18,9	30,886	71,7
4226	1	18,61	-74,992	-26,544	-127,357	45,154	242,6	52,365	69,8
	2	-24,415	-99,803	-74,359	-136,811	49,944	204,6	37,008	37,1
	3	2,768	-107,849	-3,852	-137,807	6,62	239,2	29,958	27,8
	4	52,815	-90,445	49,623	-134,386	3,192	6,0	43,941	48,6
4227	1	77,863	-111,011	99,029	-179,072	21,166	27,2	68,061	61,3
	2	20,872	-76,656	0,127	-134,588	20,745	99,4	57,932	75,6
	3	8,218	-95,468	-1,635	-170,442	9,853	119,9	74,974	78,5
	4	67,862	-132,425	104,28	-221,776	36,418	53,7	89,351	67,5
4228	1	72,342	-87,943	135,263	-138,424	62,921	87,0	50,481	57,4
	2	43,869	-65,64	29,283	-154,737	14,586	33,2	89,097	135,7
	3	-33,296	-216,504	-119,086	-451,295	85,79	257,7	234,791	108,4
	4	-8,358	-235,319	1,471	-449,62	9,829	117,6	214,301	91,1
5874	1	-19,486	-105,758	-58,526	-155,948	39,04	200,3	50,19	47,5
	2	25,003	-68,056	-7,911	-108,798	32,914	131,6	40,742	59,9
	3	17,332	-95,497	-35,769	-158,397	53,101	306,4	62,9	65,9
	4	-36,762	-123,36	-100,748	-191,055	63,986	174,1	67,695	54,9
5875	1	-17,073	-94,409	-99,399	-186,232	82,326	482,2	91,823	97,3
	2	23,903	-86,143	-19,942	-137,361	43,845	183,4	51,218	59,5
	3	14,678	-97,44	-24,497	-129,762	39,175	266,9	32,322	33,2
	4	-28,052	-104,219	-104,381	-178,728	76,329	272,1	74,509	71,5
5876	1	3,731	-71,455	-91,776	-146,179	95,507	2559,8	74,724	104,6
	2	22,622	-96,133	-18,466	-122,669	41,088	181,6	26,536	27,6
	3	7,658	-78,286	2,48	-82,642	5,178	67,6	4,356	5,6
	4	-9,363	-55,685	-61,898	-115,431	52,535	561,1	59,746	107,3
5878	1	3,928	-78,524	-32,446	-125,437	36,374	926,0	46,913	59,7
	2	10,482	-58,765	-20,65	-102,476	31,132	297,0	43,711	74,4
	3	1,506	-66,165	-34,398	-124,664	35,904	2384,1	58,499	88,4
	4	-6,93	-83,932	-50,972	-142,844	44,042	635,5	58,912	70,2
5879	1	0,646	-75,346	-32,754	-124,833	33,4	5170,3	49,487	65,7
	2	4,947	-61,328	-18,247	-113,437	23,194	468,8	52,109	85,0
	3	3,096	-63,697	-21,828	-115,384	24,924	805,0	51,687	81,1
	4	-1,554	-77,634	-37,846	-125,741	36,292	2335,4	48,107	62,0
5880	1	5,659	-77,053	-31,772	-121,117	37,431	661,4	44,064	57,2
	2	11,107	-60,634	-6,546	-108,119	17,653	158,9	47,485	78,3
	3	4,072	-44,874	12,752	-50,563	8,68	213,2	5,689	12,7
	4	-3,349	-59,566	-17,891	-58,523	14,542	434,2	1,043	1,8

Tabla 68. Diferencia de esfuerzos en los planos x y y en el área de análisis producidos por la carga permanente vs carga permanente + carga térmica a 28°.

Elemento	Nodo	Dead load		Dead load + temp		σ_x		σ_y	
		σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)	Dif. Absoluta	Dif. Relativa (%)
4222	1	-28,901	-21,404	-74,957	-55,94	46,056	159,4	34,536	161,4
	2	-31,869	-44,006	-78,398	-88,061	46,529	146,0	44,055	100,1
	3	-33,974	-41,736	-74,433	-83,795	40,459	119,1	42,059	100,8
	4	-30,878	-19,552	-70,778	-52,162	39,9	129,2	32,61	166,8
4223	1	-26,194	-3,099	-59,423	-13,701	33,229	126,9	10,602	342,1
	2	-32,366	-37,522	-72,854	-79,815	40,488	125,1	42,293	112,7
	3	-70,267	-49,188	-153,17	-104,906	82,903	118,0	55,718	113,3
	4	-63,962	-14,825	-139,542	-38,794	75,58	118,2	23,969	161,7
4224	1	-65,362	-19,748	-139,709	-40,101	74,347	113,7	20,353	103,1
	2	-59,016	-11,473	-127,007	-17,183	67,991	115,2	5,71	49,8
	3	16,516	10,941	5,775	22,359	10,741	65,0	11,418	104,4
	4	10,211	2,567	-6,862	-0,692	17,073	167,2	3,259	127,0
4226	1	-16,482	-39,899	-68,352	-85,549	51,87	314,7	45,65	114,4
	2	-28,931	-95,287	-76,38	-134,789	47,449	164,0	39,502	41,5
	3	-17,615	-87,466	-26,485	-115,175	8,87	50,4	27,709	31,7
	4	-5,076	-32,554	-18,311	-66,452	13,235	260,7	33,898	104,1
4227	1	-4,145	-29,004	-17,146	-62,896	13,001	313,7	33,892	116,9
	2	-6,044	-49,74	-24,705	-109,756	18,661	308,8	60,016	120,7
	3	-30,059	-57,191	-52,667	-119,411	22,608	75,2	62,22	108,8
	4	-28,003	-36,561	-44,873	-72,624	16,87	60,2	36,063	98,6
4228	1	-16,744	1,143	-18,467	15,306	1,723	10,3	14,163	1239,1
	2	-14,959	-6,811	-41,978	-83,476	27,019	180,6	76,665	1125,6
	3	-190,365	-59,436	-384,246	-186,135	193,881	101,8	126,699	213,2
	4	-192,103	-51,574	-360,665	-87,484	168,562	87,7	35,91	69,6
5874	1	-29,632	-95,612	-78,762	-135,712	49,13	165,8	40,1	41,9
	2	-12,739	-30,314	-59,425	-57,285	46,686	366,5	26,971	89,0
	3	-42,846	-35,319	-122,298	-71,868	79,452	185,4	36,549	103,5
	4	-60,066	-100,056	-142,205	-149,597	82,139	136,7	49,541	49,5
5875	1	-48,822	-62,66	-140,912	-144,719	92,09	188,6	82,059	131,0
	2	-39,197	-23,043	-113,699	-43,604	74,502	190,1	20,561	89,2
	3	-54,786	-27,976	-110,455	-43,805	55,669	101,6	15,829	56,6
	4	-64,853	-67,418	-138,405	-144,705	73,552	113,4	77,287	114,6
5876	1	-50,202	-17,522	-128,378	-109,577	78,176	155,7	92,055	525,4
	2	-52,409	-21,103	-107,041	-34,094	54,632	104,2	12,991	61,6
	3	-50,146	-20,482	-60,032	-20,129	9,886	19,7	0,353	1,7
	4	-48,35	-16,698	-82,037	-95,292	33,687	69,7	78,594	470,7
5878	1	-37,276	-37,319	-91,33	-66,553	54,054	145,0	29,234	78,3
	2	-33,124	-15,159	-86,284	-36,843	53,16	160,5	21,684	143,0
	3	-47,821	-16,838	-116,146	-42,916	68,325	142,9	26,078	154,9
	4	-52,333	-38,529	-121,79	-72,026	69,457	132,7	33,497	86,9
5879	1	-48,591	-26,108	-113,562	-44,026	64,971	133,7	17,918	68,6
	2	-45,929	-10,452	-109,735	-21,949	63,806	138,9	11,497	110,0
	3	-49,145	-11,455	-113,497	-23,715	64,352	130,9	12,26	107,0
	4	-52,225	-26,963	-117,981	-45,606	65,756	125,9	18,643	69,1
5880	1	-50,628	-20,767	-115,862	-37,026	65,234	128,8	16,259	78,3
	2	-46,392	-3,135	-107,968	-6,697	61,576	132,7	3,562	113,6
	3	-39,728	-1,074	-48,824	11,013	9,096	22,9	12,087	1125,4
	4	-44,367	-18,548	-57,363	-19,051	12,996	29,3	0,503	2,7

Capítulo 4: Análisis de resultados

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos del modelo estructural del puente ferroviario de Záběhlice. Se inicia con la validación del modelo, comparando las deformaciones simuladas con mediciones experimentales obtenidas en pruebas de carga. Posteriormente, se detallan los resultados de las simulaciones de diferentes escenarios de daño, examinando su impacto en el comportamiento estructural del puente bajo diversas condiciones de carga.

4.1 Validación

La validación del modelo estructural se realizó mediante la comparación de las deformaciones experimentales y simuladas en dos puntos de medición, identificados como uz1 y uz2, a lo largo del tiempo durante el tránsito de un tren a distintas velocidades sobre la estructura.

Al analizar los datos, se observa que al inicio del experimento, específicamente en los primeros segundos, el modelo presenta un error absoluto y relativo del 100%. Esto se debe a que el modelo no predice ninguna deformación en estos primeros instantes, mientras que las deformaciones experimentales, aunque pequeñas, están presentes. Sin embargo, a medida que avanza el tiempo, el error relativo disminuye considerablemente.

En los tres escenarios de validación se muestra un aumento significativo del error cuando la deformación alcanza valores máximos positivos. El caso ZS1 del sensor uz2 presenta el error relativo más elevado, alcanzando un valor de 29.9%. Es necesario destacar que aunque el error relativo es considerablemente alto, la diferencia absoluta entre medidas de deformación es de 0.44 mm, aceptable en el contexto de la ingeniería estructural.

Estos errores además pueden atribuirse a la complejidad de las interacciones de las cargas dinámicas que ocurren cuando un tren transita el puente. Las interacciones dinámicas presentan un alto grado de complejidad para su modelado preciso, lo cual puede introducir variaciones adicionales en los resultados simulados.

En los tres casos de validación, la deformación positiva simulada fue mayor, especialmente cuando el tren se encontraba transitando por el tercer tramo del puente. Esta discrepancia puede atribuirse a varias razones. Primero, las simplificaciones y asunciones del modelo estructural, como la distribución uniforme de las cargas, pueden no reflejar completamente las condiciones reales del puente, llevando a una sobrestimación de las deformaciones positivas.

Otro punto por considerar es que la carga del tren se modeló como una carga lineal de múltiples pasos (linear multi-step static). Este tipo de modelado implica la aplicación secuencial de patrones de carga espacial, simulando el paso del tren a través del puente en varios pasos discretos. Esta configuración aplica las cargas del tren en una serie de pasos lineales, cada uno representando una posición diferente del tren sobre el puente.

Aunque esto permite una simulación detallada del tránsito del tren, puede no capturar completamente los efectos dinámicos que ocurren en la realidad, como las vibraciones y resonancias inducidas, en cada paso del análisis, se sincronizan y superponen las cargas aplicadas, lo que puede resultar en una sobreestimación de las deformaciones en ciertos puntos.

En los casos ZS1, ZS3 y ZS4, se observó una mayor deformación medida en el sensor Uz2 cuando el tren se encontraba transitando por el primer y tercer tramo del puente. En contraste, cuando el tren transitaba por el segundo tramo, el sensor Uz1 siempre indicó mayor deformación. Las razones detrás de estas diferencias pueden ser diversas. La rigidez local en la región alrededor de Uz1 podría ser menor, lo que resulta en mayores deformaciones. Estas diferencias también pueden estar influidas por las características específicas del diseño estructural y las condiciones materiales en estas áreas.

Por otro lado, es importante mencionar que, en contraste con los valores de desplazamiento máximos positivos, los valores de desplazamiento máximos negativos no mostraron un error relativo mayor al 4.7%. Esto sugiere que el modelo es más preciso en predecir las deformaciones negativas, lo cual puede estar relacionado con la naturaleza de las cargas dinámicas y cómo estas interactúan con la estructura en las diferentes fases del tránsito del tren.

La tabla 7 muestra una comparación estadística del error absoluto medido en cada uno de los casos de validación. Se observa que de estos, el caso ZS4, correspondiente a una velocidad de 70 km/h es el más preciso, pues muestra una media del error absoluto más baja y una desviación estándar menor en ambos puntos de medición en comparación con los otros casos. La menor dispersión de errores en ZS4 sugiere una mayor consistencia en la precisión del modelo.

En contraste, los casos ZS1 (5 km/h) y ZS3 (35 km/h) presentan una mayor dispersión de los errores, con desviaciones estándar más altas. Esto indica una mayor variabilidad en la precisión del modelo bajo estas condiciones, lo que puede deberse a las diferencias en las dinámicas de carga a velocidades más bajas y moderadas. En estos casos, la media del error absoluto es ligeramente superior en Uz1 en comparación con Uz2 para ZS3, mientras que para ZS1, la media del error absoluto es similar en ambos puntos de medición.

4.2 Simulaciones

A continuación, se analizan y discuten los resultados obtenidos, presentados en el capítulo anterior, en relación con los daños y las variaciones de esfuerzos observadas durante cada tipo de daño simulado.

4.2.1 Fatiga

Para analizar el impacto del agrietamiento por fatiga en la deformación de la estructura, se modelaron una serie de grietas a lo largo del segundo tramo del puente. Primeramente, en las figuras 64 y 65 se muestra el cambio en la deformación que experimentan los puntos centrales del tramo 2, en las vigas derecha e izquierda

respectivamente. Las tablas 8 y 9 detallan la diferencia absoluta y relativa entre las deformaciones al transitar una locomotora a 70 km/h.

Se puede observar que en la viga derecha ocurren deformaciones más pronunciadas que en la viga izquierda. Este resultado es esperable, ya que en la viga derecha se simuló una grieta justo en el punto central, donde se ubica el nodo 2972. A esta velocidad, al tren le tomó aproximadamente 2 segundos recorrer cada tramo. En los primeros 2 segundos, se observa una diferencia relativa constante en la deformación (9,6% en promedio). A partir de este punto, la diferencia de deformaciones alcanza su máximo en el segundo 3.1, con una diferencia de 0.98 mm. La diferencia máxima en la viga izquierda fue de 0.55 mm y ocurrió en el segundo 3.2. El intervalo de 3 s a 3.2 s se considera más crítico, pues es cuando el tren transitaba por la parte central del segundo tramo. En ambas vigas, la deformación máxima positiva ocurrió en el segundo 1.4 y fue de 2.07 mm, con una diferencia absoluta de 0.18 mm.

La tabla 10 muestra la diferencia de esfuerzos observada en ambos nodos debido a las grietas simuladas. Es esperable que la diferencia en el nodo derecho sea mayor, ya que la grieta 3 se modeló a aproximadamente 79 mm de la ubicación del nodo. El esfuerzo en el plano Y es considerablemente mayor, con una diferencia absoluta de 74 MPa, lo que representa un incremento del 227% en comparación con su esfuerzo en condiciones sin grietas. En el plano X, esta grieta produjo un aumento de 4 MPa.

El análisis de los esfuerzos, especialmente en el plano Y, que muestra un aumento considerable de 74 MPa (un 227% más respecto a las condiciones sin grietas), sugiere que la presencia de la grieta tiene un impacto significativo en la capacidad de la estructura para soportar cargas verticales. El aumento de 4 MPa en el plano X, aunque menor, también indica que las grietas afectan la distribución de esfuerzos en múltiples direcciones.

Esfuerzos ocasionados por la carga permanente

Las tablas 11, 15, 19, 23, 27 y 31 presentan la diferencia de esfuerzos máximos y mínimos en las zonas directamente influenciadas por las grietas, mostrando la variación de esfuerzos debido a la carga permanente. Por otro lado, las tablas 13, 17, 21, 25, 29 y 33 detallan la variación de esfuerzos en las áreas adyacentes a las zonas directamente afectadas, también bajo la influencia de la carga permanente.

En detalle, las tablas 11, 15 y 19 corresponden a las grietas 1, 2 y 3 de la viga izquierda, respectivamente. Mientras tanto, las tablas 23, 27 y 31 se refieren a las grietas 1, 2 y 3 de la viga derecha. Cada una de estas tablas muestra tres polígonos formados al dividir el elemento por la grieta, detallando la variación de esfuerzos en los nodos de cada uno de estos polígonos.

Al analizar la grieta 1, se observa que los nodos 3 y 4 del elemento 9114 experimentan los mayores cambios en los esfuerzos. El nodo 3 muestra una diferencia absoluta de 342.45 MPa en el esfuerzo máximo y 755.104 MPa en el esfuerzo mínimo, lo que representa un aumento del 3876.9% y 1756.1%, respectivamente, en comparación con el escenario sin grietas. Estos valores sugieren que la grieta amplifica considerablemente los esfuerzos a los que está sometido el nodo, especialmente bajo cargas de tracción (valores negativos).

El nodo 4 también muestra un aumento significativo en los esfuerzos, con una diferencia absoluta de 305.638 MPa en el esfuerzo máximo y 975.597 MPa en el esfuerzo mínimo. Esto equivale a un incremento del 2912.5% y 1918.7%, respectivamente. Estos resultados indican que la grieta también afecta la distribución de esfuerzos en este nodo, aumentando su magnitud tanto en compresión como en tracción.

En los elementos 9135 y 9136, el nodo 2 es el más afectado por la presencia de grietas, experimentando aumentos considerables en los esfuerzos máximos y mínimos. En el elemento 9135, estos aumentos alcanzan el 686.5% y 858.4% respectivamente, mientras que en el elemento 9136, los incrementos son aún mayores, llegando al 1940.1% y 372.7%. Aunque en menor medida, los nodos adyacentes también muestran cambios en los esfuerzos, lo que indica que la grieta afecta la distribución de esfuerzos en todo el elemento, siendo el nodo 2 el más crítico. Estos resultados resaltan la importancia de considerar el efecto de las grietas en la capacidad de los elementos para resistir cargas, especialmente en los nodos más cercanos a ellas. Esto se puede

identificar gráficamente en las figuras 66 y 67 donde se visualiza el incremento de esfuerzo en las zonas adyacentes a la grieta.

Este comportamiento es similar en el resto de áreas con agrietamiento, en la viga izquierda se observa que la grieta 2 produce un mayor incremento de esfuerzos debido a la carga permanente. Esta presenta la mayor variación en los esfuerzos, tanto en términos de diferencias absolutas como relativas. Esto se evidencia en los valores máximos de las diferencias absolutas y relativas en los esfuerzos máximos y mínimos, que son considerablemente más altos en este grupo en comparación con los grietas 1 y 3

Por ejemplo, en el elemento 9139 de la grieta 2, el nodo 1 muestra una diferencia absoluta de 243.4 MPa y una diferencia relativa de 1046.3% en el esfuerzo máximo, valores que superan ampliamente los observados en los otros grupos.

En cuanto a la viga derecha, al analizar las grietas 1, 2 y 3, podemos observar que el área con la grieta 2 sigue siendo la más afectada, aunque con algunas particularidades en comparación con los resultados anteriores. Por ejemplo, en la grieta 1, los elementos 8618 y 9144 presentan las mayores variaciones en los esfuerzos. El nodo 2 del elemento 8618 muestra la mayor diferencia absoluta en el esfuerzo mínimo (-1171.02 MPa), mientras que el nodo 1 del elemento 9144 presenta la mayor diferencia relativa en el esfuerzo mínimo (8981.7%). Estos resultados sugieren que las grietas en estos nodos amplifican significativamente los esfuerzos de tracción.

El área con la grieta 2 sigue siendo la más afectada, con variaciones considerables en los esfuerzos en todos los elementos. Destaca el elemento 8785, donde los nodos 2 y 3 muestran las mayores diferencias absolutas y relativas en los esfuerzos máximos (677.204 MPa y 2375.2% para el nodo 2, y 670.376 MPa y 2469.6% para el nodo 3). Esto indica que las grietas en estos nodos tienen un impacto crítico en la capacidad del elemento para resistir cargas de compresión.

En el área con la grieta 3, el elemento 8958 presenta las mayores variaciones, especialmente en el nodo 3, con una diferencia absoluta de 873.283 MPa y una diferencia relativa de 2776.0% en el esfuerzo máximo. Esto sugiere que la grieta en este nodo amplifica considerablemente los esfuerzos de compresión.

Esfuerzos en planos X y Y ocasionados por la combinación carga permanente + carga de viento

De manera similar, las tablas 12, 16, 20, 24, 28 y 32 presentan la diferencia de esfuerzos en los planos X y Y en las zonas directamente influenciadas por las grietas, mostrando la variación de esfuerzos debido a la combinación de carga permanente + carga de viento. Por otro lado, las tablas 14, 18, 22, 26, 30 y 34 detallan la variación de esfuerzos en las áreas adyacentes a las zonas directamente afectadas, también bajo la influencia de esta combinación de cargas.

El análisis de los esfuerzos en los planos X y Y resultantes de la combinación de carga permanente y carga de viento en las zonas agrietadas revela un impacto significativo en la distribución de tensiones en elementos específicos de ambas vigas del puente.

En el caso de la viga izquierda, en la grieta 1 los elementos 9114 y 9135 presentan las mayores variaciones en los esfuerzos. En el elemento 9114, los nodos 3 y 4 experimentan aumentos considerables en los esfuerzos absolutos, tanto en el plano X como en el Y. El nodo 3 muestra un aumento de 702.013 MPa en el esfuerzo en el plano X y 357.413 MPa en el plano Y, lo que representa un incremento relativo de 1786.3% y 6960.3% respectivamente. El nodo 4 también muestra aumentos significativos en ambos planos, con una diferencia absoluta de 736.35 MPa en el plano X y 473.627 MPa en el plano Y.

En la grieta 2, el elemento 9137 destaca por los mayores cambios en los esfuerzos. El nodo 2 muestra un aumento de 196.833 MPa en el esfuerzo en el plano X y 119.493 MPa en el plano Y, lo que representa un incremento relativo de 804.0% y 1593.0% respectivamente.

Es importante destacar que el elemento 9114, de la grieta 1 es el que presenta los mayores incrementos absolutos en los esfuerzos, lo que indica que esta zona es la más crítica en términos de magnitud de los esfuerzos adicionales inducidos por las grietas. Sin embargo, el elemento 9136 (grieta 3) muestra los mayores incrementos relativos en el esfuerzo en el plano Y (1940.1%), lo que sugiere que esta grieta tiene un impacto proporcionalmente mayor en la capacidad del elemento para resistir cargas de tracción.

De manera similar, para la viga derecha, en la grieta 1 los elementos 8618 y 9142 presentan las mayores variaciones en los esfuerzos. En el elemento 8618, los nodos 2 y 3 experimentan aumentos considerables en los esfuerzos absolutos. El nodo 2 muestra un aumento de 935.564 MPa en el esfuerzo en el plano X y 507.778 MPa en el plano Y, lo que representa un incremento relativo de 3600.7% y 5918.2% respectivamente. Estos valores indican que la grieta en este nodo amplifica considerablemente los esfuerzos a los que está sometido el elemento, especialmente bajo cargas de tracción (valores negativos). El nodo 3 también muestra aumentos significativos en ambos planos, con una diferencia absoluta de 577.188 MPa en el plano X y 313.584 MPa en el plano Y.

En el elemento 9142, los nodos 1 y 2 muestran las mayores variaciones. El nodo 2 experimenta un aumento de 209.387 MPa en el plano X y 127.626 MPa en el plano Y, con incrementos relativos de 578.9% y 888.3% respectivamente. Estos valores sugieren un impacto significativo de la grieta en la distribución de esfuerzos en este nodo.

En la grieta 2, los elementos 8785 y 9145 son los más afectados. En el elemento 8785, el nodo 2 muestra un aumento de 530.209 MPa en el esfuerzo en el plano X, lo que representa un incremento relativo del 2018.0%, y un incremento de 354.417 MPa en el plano Y, correspondiente a un aumento relativo del 7467.7%. El nodo 3 de este mismo elemento también experimenta incrementos significativos, con diferencias absolutas de 520.109 MPa en el plano X y 327.519 MPa en el plano Y.

En el elemento 9145, el nodo 1 muestra un aumento de 120.645 MPa en el plano X, con un incremento relativo del 462.0%, y un aumento de 1.913 MPa en el plano Y, lo que representa un incremento relativo del 1138.7%. El nodo 2 del elemento 9145 también experimenta aumentos considerables, con 161.853 MPa en el plano X y 111.542 MPa en el plano Y.

En la grieta 3, el elemento 8958 se destaca por los mayores cambios en los esfuerzos. El nodo 2 muestra un aumento de 621.945 MPa en el esfuerzo en el plano X, lo que representa un incremento relativo del 1826.2%, y un aumento de 225.965 MPa en el plano Y, correspondiente a un incremento relativo del 2224.9%. El nodo 3 de este elemento también muestra incrementos significativos en ambos planos, con diferencias absolutas de 643.243 MPa en el plano X y 290.439 MPa en el plano Y.

El elemento 9148 también presenta variaciones importantes, especialmente en el nodo 2, donde se observa un aumento de 276.145 MPa en el plano X, lo que representa un incremento relativo del 999.5%, y un aumento de 153.901 MPa en el plano Y, con un incremento relativo del 1924.5%.

Estos resultados indican que, aunque la grieta 1 muestra los mayores incrementos absolutos y relativos, las grietas 2 y 3 también tienen un impacto significativo en la estructura, especialmente en los elementos mencionados. Es esencial considerar estos incrementos al evaluar la integridad estructural y planificar intervenciones de refuerzo para las áreas afectadas por las grietas.

4.2.2 Corrosión

Para analizar el impacto de la corrosión en la deformación de la estructura, se modelaron cinco áreas corroídas a lo largo del segundo tramo del puente. Primeramente, en las figuras 85 y 86 se muestran gráficas con el cambio en la deformación que experimentan los puntos centrales del tramo 2, en las vigas derecha e izquierda respectivamente. Las tablas 35 y 36 detallan la diferencia absoluta y relativa entre las deformaciones al transitar una locomotora a 70 km/h.

En los primeros 2 segundos, se observa una diferencia relativa constante en la deformación (1.46% en promedio). A partir de este punto, la diferencia de deformaciones alcanza su máximo en el segundo 3.1, con una diferencia de 0.069 mm. La diferencia máxima en la viga izquierda fue de 0.016 mm y ocurrió en el segundo 3.2. Pese a que algunos segmentos se simularon con una reducción del 50% de su área transversal la estructura no llegó a presentar una diferencia de deformación significativa.

En las figuras 87, 89, 91, 93 y 95 se presenta un detalle de cada una de las 5 áreas de corrosión, por otra parte, las figuras 88, 90, 92, 94 y 96 se muestra una descripción de la reducción de área aplicada en el análisis.

Esfuerzos ocasionados por la carga permanente

Las tablas 37, 40, 43, 46 y 49 presentan la diferencia de esfuerzos máximos y mínimos en las áreas de corrosión 1 a 5 respectivamente, mostrando la variación de esfuerzos debido a la carga permanente. El análisis de los esfuerzos máximos y mínimos en el área de corrosión 1, bajo cargas permanentes, revela un incremento significativo en los esfuerzos en comparación con el escenario sin daños. Los elementos 1330 y 1331 son los más afectados, experimentando un aumento notable en los esfuerzos tanto máximos como mínimos.

En el elemento 1330, el nodo 1 presenta el mayor incremento absoluto en el esfuerzo máximo, con un aumento de 113.335 MPa, lo que representa un incremento relativo del 297.8%. En cuanto al esfuerzo mínimo, el nodo 2 muestra la mayor diferencia absoluta con 121.3 MPa y un incremento relativo del 148.5%. En el elemento 1331, el nodo 1 experimenta un aumento absoluto en el esfuerzo máximo de 173.694 MPa, con un incremento relativo del 294.8%. El nodo 2 muestra la mayor diferencia absoluta en el esfuerzo mínimo con 106.761 MPa, representando un aumento relativo del 148.0%.

En general, los resultados indican que la corrosión en el área 1 amplifica los esfuerzos en los elementos cercanos, especialmente en los nodos 1 y 2, que son los más críticos en términos de magnitud de los esfuerzos adicionales inducidos por la corrosión. Es importante destacar que los incrementos relativos en los esfuerzos mínimos son mayores que los incrementos relativos en los esfuerzos máximos, sugiriendo que la corrosión afecta principalmente la capacidad de los elementos para resistir cargas de tracción.

En el área de corrosión 2, se implementó una reducción del 50% del área transversal en los elementos 2681, 2682, 2685 y 2686. Los elementos que sufrieron una reducción del 50% presentan incrementos absolutos notables en los esfuerzos máximos y mínimos. Por ejemplo, en el elemento 2681, los nodos muestran diferencias significativas, con incrementos de hasta 45.701 MPa en el esfuerzo máximo y 11.055 MPa en el mínimo. En particular, el nodo 2 de este elemento presenta una diferencia absoluta en el esfuerzo máximo de 45.701 MPa, lo que representa una diferencia relativa del 70.2%. El elemento 2685 también muestra diferencias considerables, con el nodo 1 presentando un incremento de 46.138 MPa en el esfuerzo máximo y 5.161 MPa en el mínimo, con diferencias relativas del 71.9% y 224.0%, respectivamente. De manera similar, en el elemento 2686, el nodo 1 exhibe una diferencia absoluta de 30.661 MPa (65.8%) en el esfuerzo máximo y 2.727 MPa (26.8%) en el mínimo.

En contraste, los elementos con una reducción del 35% muestran variaciones menores. Por ejemplo, en el elemento 1292, las diferencias absolutas en los esfuerzos máximos oscilan entre 3.229 MPa y 10.221 MPa, y en los mínimos entre 0.499 MPa y 14.294 MPa. Aunque el elemento 2677 presenta una diferencia absoluta de 57.465 MPa en el esfuerzo máximo, las diferencias relativas son menores comparadas con los elementos con una reducción del 50%. El elemento 2729 muestra diferencias absolutas significativamente menores en los esfuerzos, con incrementos máximos de 10.689 MPa y mínimos de 13.222 MPa, y diferencias relativas que en su mayoría no superan el 25%.

Se observa un patrón consistente donde los elementos con una reducción del 50% presentan mayores variaciones tanto en términos absolutos como relativos. Este patrón es evidente en todos los nodos de estos elementos, indicando que una mayor reducción del área debido a la corrosión resulta en incrementos más significativos en los esfuerzos estructurales. Este resultado también se observa en el área de corrosión 4, donde algunos de sus elementos también se modelaron con una reducción del 50%.

Al evaluar los datos, se concluye que el área de corrosión 1 experimentó los mayores aumentos de esfuerzos. Esta área muestra tanto las diferencias absolutas como relativas más altas en varios nodos y elementos, destacándose significativamente por encima de las otras áreas. Las áreas 2 y 4 también muestran aumentos considerables, aunque no alcanzan los niveles observados en el área 1. El área de corrosión 3 tiene aumentos relativos altos en algunos nodos específicos, pero con diferencias absolutas generalmente menores. Finalmente, el área de corrosión 5 presenta los aumentos más bajos en comparación con las demás áreas.

Las tablas 38, 41, 44, 47 y 50 presentan las variaciones de esfuerzos en los planos X y Y para las áreas de corrosión 1 a 5, respectivamente. Al analizar estas variaciones en las cinco áreas de corrosión, se identificaron las áreas con mayores diferencias absolutas y relativas. El área de corrosión 1 experimentó los mayores aumentos de esfuerzos en ambos planos, mostrando las diferencias absolutas y relativas más altas en varios nodos y elementos, destacándose significativamente por encima de las otras áreas. Las áreas 2 y 4 también muestran aumentos considerables, aunque no alcanzan los niveles observados en el área 1. El área de corrosión 3 presenta aumentos relativos altos en algunos nodos específicos, pero con diferencias absolutas generalmente menores. Finalmente, el área de corrosión 5 presenta los aumentos más bajos en comparación con las demás áreas.

Estas variaciones se pueden observar gráficamente en las figuras 97, 98, 99, 100 y 101, para las áreas 1 a 5 respectivamente.

Esfuerzos en planos X y Y ocasionados por la combinación carga permanente + carga térmica (-10°C)

Las tablas 39, 42, 45, 48 y 51 muestran las variaciones de esfuerzos en los planos X y Y ocasionadas por la combinación de carga permanente y carga térmica, en escenarios con y sin daños por corrosión, para las áreas de corrosión 1 a 5 respectivamente. De manera similar, las tablas 52, 53, 54, 55 y 56 comparan los esfuerzos producidos por la carga permanente con los esfuerzos resultantes de la combinación de carga permanente y carga térmica, enfocándose en áreas con daños. Estas tablas ilustran cómo varían los esfuerzos en áreas dañadas al incluir la carga térmica.

El análisis de los esfuerzos al incorporar la carga térmica en áreas dañadas revela incrementos significativos. En el área de corrosión 1, el elemento 1331, nodo 2, muestra un incremento absoluto de 24.785 MPa en el esfuerzo en X (50.12%) y 31.886 MPa en Y (214.75%). En el nodo 3, el aumento absoluto en el esfuerzo en X es de 28.097 MPa (38.70%) y en Y es de 32.873 MPa (368.12%). En el elemento 2716, el nodo 1 presenta un aumento de 21.793 MPa (51.24%) en el esfuerzo en X y 30.989 MPa (193.50%) en Y. En el nodo 4, el incremento en el esfuerzo en X es de 28.527 MPa (38.64%) y en Y es de 33.000 MPa (379.22%). El elemento 2720 presenta incrementos importantes en sus nodos: en el nodo 1, se observa un incremento absoluto de 25.135 MPa en el esfuerzo en X, representando un aumento relativo del 41.67%, y en el esfuerzo en Y, el aumento es de 9.662 MPa, con un incremento relativo del 43.55%. En el nodo 2, el esfuerzo en X aumenta en 22.34 MPa (43.55%) y en Y aumenta en 0.222 MPa (33.74%).

En el área de corrosión 2, el elemento 2677, nodo 4, presenta un aumento de 8.351 MPa (17.04%) en el esfuerzo en X y de 14.815 MPa (38.09%) en Y. En el elemento 2681, el nodo 2 muestra un incremento en el esfuerzo en X de 12.867 MPa (11.49%) y en Y de 2.171 MPa (253.33%). El elemento 2689 también muestra aumentos significativos: en el nodo 1, el esfuerzo en X aumenta en 4.049 MPa (9.44%) y en Y en 0.905 MPa (7.77%); en el nodo 2, se observa un incremento absoluto de 7.025 MPa (16.13%) en el esfuerzo en X y de 10.582 MPa (44.24%) en Y; en el nodo 3, el aumento en el esfuerzo en X es de 11.76 MPa (24.15%) y en Y es de 11.914 MPa (43.91%); y en el nodo 4, se observa un incremento absoluto de 8.797 MPa (18.32%) en el esfuerzo en X y de 2.226 MPa (14.93%) en Y.

En el área de corrosión 3, el elemento 3401, nodo 1, muestra un aumento de 20.067 MPa en el esfuerzo en X (252.35%) y de 0.803 MPa en Y (632.28%). En el elemento 3453, nodo 1, se observa un incremento de 26.561 MPa en el esfuerzo en X (276.79%) y de 22.215 MPa en Y (140.37%); en el nodo 3, el aumento en el esfuerzo en X es de 21.620 MPa (6951.77%) y en Y es de 7.655 MPa (114.10%).

En el área de corrosión 4, el elemento 4189 presenta los siguientes incrementos: en el nodo 1, el esfuerzo en X aumenta en 6.446 MPa (10.10%) y en Y en 5.548 MPa (65.29%); en el nodo 2, se observa un incremento absoluto de 9.928 MPa (12.85%) en el esfuerzo en X y de 17.255 MPa (34.75%) en Y; en el nodo 3, el aumento en el esfuerzo en X es de 2.53 MPa (2.67%) y en Y es de 14.209 MPa (26.85%); y en el nodo 4, el incremento en el esfuerzo en X es de 1.033 MPa (1.27%) y en Y es de 2.665 MPa (51.19%). En el elemento 4190, el nodo 1 muestra un incremento en el esfuerzo en X de 0.437 MPa (0.51%) y en Y de 4.661 MPa (41.83%); en el nodo 3, el aumento en el esfuerzo en X es de 10.863 MPa (18.76%) y en Y es de 12.856 MPa (36.74%).

Finalmente, en el área de corrosión 5, el elemento 5009, nodo 3, muestra un incremento en el esfuerzo en X de 31.215 MPa (594.12%) y de 23.409 MPa en Y (125.20%). En el elemento 5061, el nodo 1 presenta un aumento en el esfuerzo en X de 25.964 MPa (311.32%) y en Y de 21.835 MPa (136.10%). En el elemento 5065, el nodo 1 muestra un incremento de 18.971 MPa en el esfuerzo en X (281.97%) y de 1.999 MPa en Y (205.03%).

De esta manera, se observa que el aumento de esfuerzos al agregar una carga térmica de -10 grados en las áreas corroídas puede tener varias implicaciones importantes para la integridad estructural y la seguridad de la estructura. A continuación, se detallan algunas de las principales implicaciones:

El incremento de los esfuerzos debido a la combinación de carga permanente y carga térmica puede acelerar el proceso de fatiga en los materiales. Las variaciones térmicas pueden inducir ciclos de carga adicionales que, combinados con las cargas estructurales, pueden llevar al deterioro de los elementos.

Los elementos estructurales en áreas corroídas experimentan mayores aumentos en los esfuerzos, lo que puede reducir significativamente la vida útil de la estructura. Las tensiones adicionales pueden acelerar la degradación del material y la pérdida de sección efectiva, lo que compromete la capacidad de carga.

Los aumentos en los esfuerzos, especialmente en áreas ya debilitadas por la corrosión, pueden llevar a una pérdida de capacidad de carga. Esto es crítico en elementos sometidos a cargas elevadas, donde la capacidad residual puede ser insuficiente para soportar las cargas de diseño.

4.2.3 Apoyos

Para analizar el impacto de los daños en los apoyos sobre la deformación de la estructura, se adoptó una estrategia que consistió en disminuir su capacidad para permitir el movimiento. De esta manera, los apoyos de tipo rodillo se cambiaron por apoyos fijos. En las figuras 102 y 103 se muestra el cambio en la deformación que experimentan los puntos centrales del tramo 2, en las vigas derecha e izquierda respectivamente, al tener un apoyo dañado. Es importante mencionar que el apoyo restringido se encuentra en el mismo lado que el nodo 2972 (viga derecha). Las tablas 57 y 58 detallan la diferencia absoluta y relativa entre las deformaciones al transitar una locomotora a 70 km/h.

Asimismo, las figuras 103 y 104 muestran el cambio en la deformación al simular dos apoyos dañados, y las tablas 59 y 60 detallan sus diferencias absolutas y relativas.

Se observa que, en la condición de un apoyo dañado, para el nodo 2972, la deformación aumenta en los primeros 2.1 segundos, coincidiendo con el tránsito del tren por el primer tramo. En este intervalo, la diferencia máxima de deformación se da en el segundo 1.1 (0.55 mm). Cuando el tren atraviesa el segundo tramo, las deformaciones disminuyen, alcanzando una diferencia máxima de 0.6 mm en el segundo 3.4. En el tercer tramo, la deformación también disminuye, alcanzando una diferencia máxima de 0.53 mm en el segundo 4.9.

En el caso del nodo 2973, se repite el patrón observado en el nodo 2972, pero con diferencias menores. En el tramo 1, la diferencia máxima fue de 0.10 mm (segundo 1.1), en el tramo dos de 0.11 mm (segundo 3.4) y en el tramo 3 de 0.1 mm (segundo 4.9).

Las diferencias entre ambas vigas son esperables, ya que únicamente un apoyo se restringió, coincidiendo con la viga derecha, que presenta las diferencias más abruptas de deformación.

En cuanto a la condición de dos apoyos dañados, se observa el mismo patrón que en el caso de un apoyo dañado (deformación aumenta en el tramo 1 y disminuye en los tramos 2 y 3). Para el nodo 2972 la diferencia máxima en el tramo 1 es 0.42 mm, en el tramo 2, 0.45 mm y en el tramo 3, 0.39 mm. En el caso del nodo 2973, se muestran diferencias menores pero con el mismo patrón, en el tramo 1, la diferencia máxima fue de 0.11 mm (segundo 1.1), en el tramo dos de 0.12 mm (segundo 3.4) y en el tramo 3 de 0.11 mm (segundo 4.9).

Es importante mencionar que el apoyo restringido se encuentra entre los tramos 2 y 3. La disminución de la deformación en el tramo central cuando el apoyo se cambió de tipo rodillo a fijo puede explicarse por varias razones estructurales y de comportamiento mecánico del puente.

Primero, un apoyo de tipo rodillo permite movimientos horizontales, lo que puede causar cierta deformación longitudinal bajo cargas aplicadas. Al cambiar a un apoyo fijo, se restringen estos movimientos horizontales, lo que reduce la posibilidad de deformación en esa dirección. Esta restricción adicional aumenta la rigidez del sistema estructural, disminuyendo las deformaciones.

Un apoyo fijo proporciona mayor rigidez a la estructura en comparación con un apoyo rodillo. Esta rigidez adicional hace que la estructura sea menos susceptible a deformaciones bajo cargas aplicadas, ya que el apoyo fijo ofrece resistencia tanto en dirección vertical como horizontal.

Con un apoyo fijo o restringido, los movimientos relativos entre los diferentes segmentos de la estructura se reducen. Esto significa que los segmentos no pueden desplazarse entre sí tan fácilmente, lo que contribuye a una disminución general en las deformaciones.

La conversión de un apoyo rodillo a un apoyo fijo hace que el sistema estructural en su conjunto sea menos flexible. Esta menor flexibilidad implica que la estructura puede soportar cargas sin experimentar grandes deformaciones, lo cual es crucial para mantener la integridad estructural y funcional del puente.

Al cambiar la rigidez del sistema estructural se pueden aumentar los esfuerzos en la estructura, y este aumento puede deberse a varias causas:

Al cambiar un apoyo de tipo rodillo a fijo, se restringen los movimientos horizontales y rotacionales. Esto significa que las fuerzas que previamente podían disiparse a través del movimiento ahora se concentran en el propio apoyo y en los elementos adyacentes, lo que incrementa los esfuerzos en estas áreas.

Un apoyo fijo proporciona una reacción tanto en la dirección vertical como en la horizontal. Las reacciones adicionales resultantes de la restricción del movimiento horizontal pueden inducir esfuerzos adicionales en la estructura, especialmente en las áreas cercanas al apoyo.

En general, una estructura más rígida tiende a experimentar mayores esfuerzos bajo cargas, ya que no puede deformarse para absorber parte de la energía de la carga. Esta rigidez adicional puede resultar en mayores tensiones y esfuerzos en los elementos estructurales, aumentando el riesgo de daños o fallos en la estructura.

Lo anterior se puede observar en las figuras 106, 107, 108, 109 y 110. Donde muestran las diferencias de esfuerzos producidos en el segundo tramo al restringir uno o dos apoyos.

Para analizar el impacto de uno o dos apoyos dañados, se consideraron tres escenarios de carga: carga permanente, carga permanente más carga de viento, y carga permanente más carga térmica (28°C). La inclusión de la carga de viento tuvo como propósito agregar una carga lateral y observar la variabilidad de los esfuerzos resultantes. Por otro lado, la carga térmica se añadió debido a que las variaciones térmicas causan expansión y contracción de los materiales. En una estructura con apoyos restringidos o dañados, esta expansión o contracción no puede distribuirse uniformemente, lo que lleva a concentraciones de esfuerzos en ciertas áreas. Esto es especialmente relevante en un puente donde las temperaturas pueden variar significativamente entre diferentes momentos del día y las estaciones del año.

Además, un apoyo dañado que restringe los movimientos horizontales o rotacionales exacerba los efectos de la carga térmica. La incapacidad de la estructura para acomodar estos movimientos genera esfuerzos adicionales que pueden resultar en tensiones elevadas, deformaciones y potencialmente en fallos estructurales. Esta condición subraya la importancia de evaluar y mitigar los efectos de las cargas térmicas en estructuras con apoyos comprometidos para garantizar su integridad y seguridad a largo plazo.

En la figura 111 se puede apreciar una diferencia significativa al comparar los esfuerzos producidos por la carga permanente ante la adición de una carga térmica.

En detalle, la figura 112 muestran etiquetadas las áreas adyacentes al apoyo dañado a las que se centrará el análisis de la diferencia de esfuerzos.

La tabla 61 presenta la diferencia en los esfuerzos máximos y mínimos producidos por la carga permanente en los escenarios sin daños y con un apoyo dañado. Por otro lado, la tabla 63 muestra los mismos tipos de esfuerzos para los mismos escenarios, pero en lugar de considerar solo la carga permanente, se utiliza

la combinación de carga permanente más carga térmica (28°C). Al analizar la tabla 61, se muestra que los elementos 4222 y 4223 en particular muestran un incremento significativo tanto en los esfuerzos máximos como mínimos cuando hay daños en el apoyo. Esto sugiere que los elementos en estas áreas son particularmente vulnerables y experimentan un aumento considerable en los esfuerzos.

En el elemento 4224, el nodo 1 presenta un aumento absoluto de 13.268 MPa en los esfuerzos máximos (67.8%) y 22.929 MPa en los esfuerzos mínimos (24.1%), lo cual indica un impacto notable en este nodo debido a los daños en el apoyo.

Los nodos en el elemento 4223 también presentan incrementos significativos en los esfuerzos máximos y mínimos, especialmente el nodo 2 con un incremento absoluto de 11.785 MPa en los máximos (51.7%) y 14.035 MPa en los mínimos (15.5%)

Al analizar la tabla 63, se observan las siguientes particularidades en los esfuerzos máximos y mínimos:

En el elemento 4222, el nodo 1 muestra una diferencia absoluta de 4.58 MPa (50.0%) en los esfuerzos máximos y 16.366 MPa (14.9%) en los mínimos. Este nodo evidencia un incremento notable en las tensiones debido a la carga térmica combinada con el daño en los apoyos. Por su parte, el nodo 3 tiene una diferencia absoluta de 14.456 MPa (43.0%) en los esfuerzos máximos, lo que indica un aumento significativo de tensiones en este nodo bajo las condiciones de carga térmica.

En el elemento 4223, el nodo 1 presenta un incremento absoluto de 25.336 MPa (804.1%) en los esfuerzos máximos y 3.449 MPa (3.5%) en los mínimos, demostrando una alta sensibilidad a las variaciones térmicas. El nodo 2 muestra una diferencia absoluta de 32.61 MPa (11482.4%) en los esfuerzos máximos y 39.067 MPa (26.8%) en los mínimos. Este nodo es extremadamente vulnerable a las cargas térmicas combinadas con los daños en los apoyos. El nodo 3 tiene una diferencia absoluta de 16.578 MPa (80.0%) en los esfuerzos máximos y 70.515 MPa (38.4%) en los mínimos, destacando una susceptibilidad considerable a las cargas térmicas.

En el elemento 4224, el nodo 1 muestra una diferencia absoluta de 35.362 MPa (713.7%) en los esfuerzos máximos y 63.08 MPa (40.2%) en los mínimos. Las tensiones aumentan significativamente con la carga térmica. El nodo 3 presenta una diferencia absoluta de 36.485 MPa (151.0%) en los esfuerzos máximos y 12.532 MPa (62.7%) en los mínimos, indicando un incremento notable en las tensiones debido a las cargas térmicas.

En el elemento 4227, el nodo 1 tiene una diferencia absoluta de 60.469 MPa (156.8%) en los esfuerzos máximos y 28.99 MPa (19.3%) en los mínimos, lo que demuestra una alta sensibilidad a las condiciones de carga térmica. El nodo 4 presenta un incremento de 65.403 MPa (168.2%) en los esfuerzos máximos y 55.749 MPa (33.6%) en los mínimos, indicando que este nodo es altamente sensible a las cargas térmicas y daños en los apoyos.

En el elemento 4228, el nodo 1 muestra una diferencia absoluta de 74.467 MPa (122.5%) en los esfuerzos máximos y 24.252 MPa (21.2%) en los mínimos, evidenciando una alta influencia de la carga térmica. El nodo 3 presenta una diferencia absoluta de 28.554 MPa (31.5%) en los esfuerzos máximos y 158.748 MPa (54.3%) en los mínimos, indicando un incremento considerable de tensiones bajo las condiciones de carga térmica. Estos resultados se muestran resumidos en la tabla 67.

De la misma manera, la tabla 62 presenta la diferencia en los esfuerzos en los planos X y Y producidos por la carga permanente en los escenarios sin daños y con un apoyo dañado. Por otro lado, la tabla 64 muestra los mismos tipos de esfuerzos para los mismos escenarios, pero en lugar de considerar solo la carga

permanente, se utiliza la combinación de carga permanente más carga térmica (28°C). Al analizar ambas tablas, se puede observar un incremento en los esfuerzos al agregar la carga térmica, como era de esperar.

En el elemento 4222, para el nodo 3, en la tabla 62 se observa una diferencia absoluta de 6.397 MPa (15.8%) en el esfuerzo en el plano X. En la tabla 64, esta diferencia se incrementa a 18.353 MPa (19.8%), lo que indica un aumento significativo debido a la carga térmica. Para el nodo 4, la diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X pasa de 6.039 MPa (16.4%) en la tabla 62 a 17.326 MPa (19.7%) en la tabla 64, mostrando una alta sensibilidad a la carga térmica.

En el elemento 4223, para el nodo 3, en la tabla 62 la diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 7.523 MPa (12.0%), mientras que en la tabla 64 esta diferencia aumenta a 21.583 MPa (16.4%). Además, la diferencia en el esfuerzo en el plano Y aumenta de 11.277 MPa (29.7%) a 32.353 MPa (44.6%).

En el elemento 4227, para el nodo 2, en la tabla 62 la diferencia en el esfuerzo en el plano X es de 18.727 MPa (75.6%) y en el esfuerzo en el plano Y es de 4.261 MPa (7.9%). En la tabla 64, estas diferencias se incrementan a 53.729 MPa (68.5%) y 12.225 MPa (10.0%), respectivamente. Para el nodo 4, la diferencia en el esfuerzo en el plano X pasa de 9.543 MPa (25.4%) en la tabla 62 a 27.38 MPa (37.9%) en la tabla 64.

En el elemento 4228, para el nodo 3, en la tabla 62 la diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 50.174 MPa (35.8%) y en el esfuerzo en el plano Y es de 15.108 MPa (34.1%). En la tabla 64, estas diferencias aumentan a 143.955 MPa (59.9%) y 43.346 MPa (30.4%), respectivamente. Para el nodo 4, la diferencia en el esfuerzo en el plano X aumenta de 50.738 MPa (35.9%) en la tabla 62 a 145.571 MPa (67.7%) en la tabla 64.

En el elemento 5874, para el nodo 3, en la tabla 62 la diferencia en el esfuerzo en el plano X es de 18.198 MPa (73.8%). En la tabla 64, esta diferencia se incrementa a 52.21 MPa (74.5%). Para el nodo 4, la diferencia en el esfuerzo en el plano X pasa de 20.065 MPa (50.2%) en la tabla 62 a 57.568 MPa (68.0%) en la tabla 64.

En el elemento 5875, para el nodo 1, en la tabla 62 la diferencia en el esfuerzo en el plano X es de 19.944 MPa (69.1%) y en el esfuerzo en el plano Y es de 7.347 MPa (13.3%). En la tabla 64, estas diferencias aumentan a 57.22 MPa (68.4%) y 21.079 MPa (17.0%), respectivamente. Para el nodo 2, la diferencia en el esfuerzo en el plano X pasa de 16.58 MPa (73.3%) en la tabla 62 a 47.569 MPa (71.9%) en la tabla 64.

Las anteriores observaciones se resumen en la tabla 68.

En la tabla 65 se presentan las diferencias en los esfuerzos máximos y mínimos producidos por la combinación de carga permanente + carga de viento los escenarios sin daños y con un apoyo dañado. Por su parte, la tabla 66 muestra para el mismo caso de carga los esfuerzos en el plano X y Y. A continuación se resumen las diferencias más pronunciadas:

Esfuerzos máximos y mínimos

1. Elemento 4222:

- Nodo 3: La diferencia absoluta en los esfuerzos máximos es de 5.522 MPa (493.0%), mientras que en los mínimos es de 2.062 MPa (2.5%).
- Nodo 4: La diferencia absoluta en los esfuerzos máximos es de 8.437 MPa (58.0%), y en los mínimos es de 4.093 MPa (5.9%).

2. Elemento 4223:

- Nodo 1: La diferencia absoluta en los esfuerzos máximos es de 10.17 MPa (50.4%), y en los mínimos es de 2.302 MPa (4.1%).
- Nodo 3: La diferencia absoluta en los esfuerzos máximos es de 6.469 MPa (76.6%), y en los mínimos es de 25.859 MPa (23.5%).

3. Elemento 4227:

- Nodo 2: La diferencia absoluta en los esfuerzos máximos es de 16.052 MPa (1003.9%), y en los mínimos es de 7.658 MPa (9.1%).
- Nodo 4: La diferencia absoluta en los esfuerzos máximos es de 23.438 MPa (52.8%), y en los mínimos es de 19.968 MPa (18.0%).

4. Elemento 4228:

- Nodo 2: La diferencia absoluta en los esfuerzos máximos es de 19.971 MPa (92.9%), y en los mínimos es de 2.108 MPa (3.3%).
- Nodo 3: La diferencia absoluta en los esfuerzos máximos es de 9.458 MPa (38.5%), y en los mínimos es de 57.877 MPa (36.3%).

5. Elemento 5875:

- Nodo 1: La diferencia absoluta en los esfuerzos máximos es de 13.505 MPa (201.6%), y en los mínimos es de 14.643 MPa (18.2%).
- Nodo 4: La diferencia absoluta en los esfuerzos máximos es de 17.939 MPa (139.5%), y en los mínimos es de 1.658 MPa (1.6%).

6. Elemento 5876:

- Nodo 2: La diferencia absoluta en los esfuerzos máximos es de 31.828 MPa (61.1%), y en los mínimos es de 18.373 MPa (16.4%).
- Nodo 4: La diferencia absoluta en los esfuerzos máximos es de 4.165 MPa (29.8%), y en los mínimos es de 25.866 MPa (32.0%).

Esfuerzos en planos X y Y

1. Elemento 4222:

- Nodo 3: La diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 6.598 MPa (15.6%), y en el plano Y es de 3.138 MPa (7.9%).
- Nodo 4: La diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 6.228 MPa (17.1%), y en el plano Y es de 1.884 MPa (10.5%).

2. Elemento 4223:

- Nodo 2: La diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 5.321 MPa (13.5%), y en el plano Y es de 7.642 MPa (25.6%).

- Nodo 3: La diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 7.759 MPa (12.2%), y en el plano Y es de 11.631 MPa (30.9%).
3. Elemento 4227:
- Nodo 2: La diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 19.316 MPa (67.3%), y en el plano Y es de 4.395 MPa (8.2%).
 - Nodo 4: La diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 9.844 MPa (26.6%), y en el plano Y es de 6.373 MPa (21.6%).
4. Elemento 4228:
- Nodo 2: La diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 13.806 MPa (43.9%), y en el plano Y es de 4.057 MPa (35.2%).
 - Nodo 3: La diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 51.752 MPa (37.0%), y en el plano Y es de 15.583 MPa (35.3%).
5. Elemento 5875:
- Nodo 1: La diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 20.571 MPa (64.2%), y en el plano Y es de 7.578 MPa (13.8%).
 - Nodo 2: La diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 17.101 MPa (71.7%), y en el plano Y es de 4.629 MPa (17.0%).
6. Elemento 5876:
- Nodo 1: La diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 13.656 MPa (35.0%), y en el plano Y es de 4.2 MPa (30.4%).
 - Nodo 3: La diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X es de 24.356 MPa (33.4%), y en el plano Y es de 10.169 MPa (35.0%).

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El presente estudio ha permitido obtener importantes conclusiones sobre el comportamiento estructural de un puente de acero bajo diferentes escenarios de daño y condiciones de carga, logrando evaluar el impacto de daños típicos en su integridad y funcionalidad.

El proceso de validación del modelo estructural, que consistió en comparar las deformaciones experimentales y simuladas en puntos específicos del puente bajo diferentes condiciones de carga, reveló información crucial sobre la precisión y aplicabilidad del modelo.

Primeramente, se identificó un aumento significativo del error relativo en las deformaciones máximas positivas, alcanzando hasta un 29.9% en el caso ZS1 del sensor uz2. Aunque este error relativo es considerable, la diferencia absoluta entre las mediciones de deformación es de 0.44 mm, lo cual es aceptable en el contexto de la ingeniería estructural. Este hallazgo sugiere que, si bien el modelo puede no ser completamente preciso en la predicción de picos de deformación, su precisión general puede ser adecuada para fines de ingeniería.

A diferencia de las deformaciones positivas, los valores de desplazamiento máximos negativos no presentaron un error relativo mayor al 4.7%. Esto sugiere que el modelo es más preciso en predecir las deformaciones negativas, posiblemente debido a la naturaleza de las cargas dinámicas y su interacción con la estructura.

Se observó una tendencia en los tres casos de validación donde la deformación positiva simulada fue mayor, especialmente cuando el tren transitaba por el tercer tramo del puente. Esto puede atribuirse a simplificaciones en el modelo, como la distribución uniforme de cargas y el uso de un modelo de carga lineal de múltiples pasos, que podrían no capturar completamente los efectos dinámicos reales.

Se notaron diferencias en las deformaciones medidas por los sensores Uz1 y Uz2 dependiendo de la ubicación del tren en el puente. Estas diferencias sugieren variaciones en la rigidez local o en las características del diseño estructural en diferentes áreas del puente, lo que resalta la importancia de considerar la heterogeneidad de la estructura en el modelado.

El análisis estadístico del error absoluto y la desviación estándar reveló que el caso ZS4, correspondiente a una velocidad de 70 km/h, es el más preciso en términos de predicción de deformaciones. Esto indica que el modelo es más confiable a velocidades más altas, posiblemente debido a una mejor captura de los efectos dinámicos a medida que aumenta la velocidad del tren.

Daños de agrietamiento por fatiga

Respecto al impacto del agrietamiento en la deformación, las grietas modeladas en la viga derecha, especialmente en el nodo 2972, demostraron causar deformaciones más pronunciadas en comparación con la viga izquierda. Esto se debe a la ubicación de la grieta justo en el punto central de la viga, lo que amplifica las deformaciones. Durante el tránsito de una locomotora a 70 km/h, se observó una diferencia relativa constante en la deformación de aproximadamente 9,6% en los primeros 2 segundos, alcanzando un máximo de 0.98 mm en el segundo 3.1. Estas observaciones indican que las grietas centrales tienen un impacto significativo en la deformación estructural, especialmente en momentos críticos del tránsito del tren.

La simulación de grietas también mostró un aumento considerable en los esfuerzos, particularmente en el plano Y, donde se observó un incremento de 74 MPa (227%) en comparación con las condiciones sin grietas. Este resultado sugiere que las grietas no solo afectan la capacidad de la estructura para soportar cargas verticales, sino que también alteran la distribución de esfuerzos en múltiples direcciones. Este comportamiento es crítico para la evaluación de la integridad estructural, ya que los aumentos significativos en los esfuerzos pueden llevar a fallos estructurales si no se gestionan adecuadamente.

La combinación de carga permanente y carga de viento también mostró un impacto significativo en la distribución de esfuerzos en los planos X y Y. Los elementos más críticos, como el 9114 y el 9136 en la viga izquierda, presentaron incrementos absolutos de hasta 702.013 MPa en el esfuerzo en el plano X y 473.627 MPa en el plano Y. Estos resultados reflejan la necesidad de considerar múltiples factores de carga en la evaluación estructural, ya que las condiciones combinadas pueden exacerbar los efectos de las grietas.

Aunque la grieta 1 mostró los mayores incrementos absolutos y relativos, las grietas 2 y 3 también tuvieron un impacto significativo en la estructura. Por ejemplo, en el elemento 8785, los nodos 2 y 3 experimentaron aumentos de hasta 530.209 MPa en el esfuerzo en el plano X y 354.417 MPa en el plano Y. Estos resultados destacan que todas las grietas, independientemente de su ubicación, pueden afectar críticamente la capacidad de la estructura para resistir cargas.

Estos resultados implican que los daños por fatiga, representados por las grietas simuladas, tienen un impacto significativo en la integridad estructural del puente. La amplificación de esfuerzos y deformaciones en los elementos afectados subraya la necesidad de una monitorización continua y de intervenciones de mantenimiento adecuadas para prevenir fallos estructurales. Además, la consideración de cargas combinadas en el análisis estructural es esencial para una evaluación completa de la capacidad de la estructura para soportar condiciones reales de operación.

Daños por corrosión

Respecto al impacto de la corrosión en la estructura, las áreas corroídas experimentan un incremento en las deformaciones y esfuerzos. Los resultados muestran que incluso una reducción del 50% en la sección transversal de algunos segmentos no resultó en diferencias de deformación significativas, aunque sí en esfuerzos elevados.

Específicamente, el área de corrosión 1 muestra los mayores aumentos de esfuerzos tanto absolutos como relativos, destacándose significativamente por encima de las otras áreas analizadas. Esto indica que los elementos en esta área son particularmente vulnerables a la corrosión y requieren monitoreo y mantenimiento más intensivos.

La incorporación de una carga térmica de -10°C en las áreas corroídas provoca un incremento considerable en los esfuerzos. Este efecto se observa de manera más pronunciada en los elementos y nodos

ubicados en las áreas de corrosión 1 y 4. Los incrementos relativos y absolutos de los esfuerzos sugieren que las variaciones térmicas adicionales pueden exacerbar el deterioro estructural.

Los elementos estructurales en áreas corroídas no solo experimentan mayores aumentos en los esfuerzos, sino que también muestran una reducción significativa en su vida útil. Las tensiones adicionales pueden acelerar la degradación del material y la pérdida de sección efectiva, comprometiendo así la capacidad de carga de la estructura. La identificación de las áreas más vulnerables y la implementación de medidas correctivas son esenciales para garantizar la seguridad y la longevidad de la estructura.

Daños en apoyos

Respecto al impacto en la estructura al dañar los apoyos, los resultados destacan la importancia de la rigidez estructural en la respuesta global del puente. La adición de rigidez mediante apoyos fijos reduce las deformaciones, pero a costa de incrementar los esfuerzos en la estructura. Este equilibrio entre rigidez y flexibilidad es crucial para garantizar la integridad y funcionalidad del puente a largo plazo.

Los resultados obtenidos demuestran que cambiar un apoyo de tipo rodillo a fijo aumenta significativamente los esfuerzos en la estructura. La incorporación de cargas térmicas genera un incremento notable en los esfuerzos máximos y mínimos en varios elementos de la estructura. Por ejemplo, en el elemento 4222, nodo 3, la diferencia absoluta en el esfuerzo en el plano X se incrementó de 6.397 MPa (15.8%) a 18.353 MPa (19.8%) al añadir la carga térmica. Esto evidencia que la expansión y contracción de los materiales debido a las variaciones térmicas no se distribuyen uniformemente, generando concentraciones de esfuerzos que pueden llevar a fallos estructurales si no se gestionan adecuadamente.

La combinación de carga permanente y carga de viento también mostró incrementos significativos en los esfuerzos. En el elemento 4227, nodo 2, la diferencia en los esfuerzos máximos aumentó a 16.052 MPa (1003.9%) y los mínimos a 7.658 MPa (9.1%). Esto subraya la necesidad de considerar cargas laterales en el diseño y evaluación de estructuras de puentes, ya que los vientos pueden inducir tensiones adicionales considerables.

Los análisis realizados identificaron elementos y nodos específicos que son particularmente vulnerables a los cambios en las condiciones de apoyo y la adición de cargas térmicas y de viento. Por ejemplo, el elemento 4223, nodo 3, mostró un incremento absoluto en el esfuerzo en el plano X de 7.523 MPa (12.0%) a 21.583 MPa (16.4%) y en el plano Y de 11.277 MPa (29.7%) a 32.353 MPa (44.6%) al considerar la carga térmica. Este tipo de información es crucial para focalizar esfuerzos de mantenimiento y reforzamiento en áreas críticas.

Recomendaciones

Para profundizar en la comprensión de la dinámica estructural del puente, se recomienda a futuros investigadores explorar modelos de carga no lineales que capturen con mayor precisión los efectos dinámicos del tráfico ferroviario, incluyendo vibraciones y resonancias. Esto podría mejorar la precisión de las predicciones de deformación, especialmente en condiciones de carga máxima.

Se sugiere llevar a cabo investigaciones adicionales para comprender las variaciones en la rigidez local observadas en diferentes áreas del puente. Un análisis detallado de las características del diseño y la construcción en estas áreas podría conducir a mejoras en futuros diseños y modelos estructurales.

Se recomienda refinar el modelo estructural actual mediante la incorporación de modelos de carga más sofisticados que consideren la distribución no uniforme de cargas y la variabilidad en las propiedades de los materiales a lo largo del puente. Esto mejoraría la precisión en la predicción de deformaciones máximas positivas y proporcionaría una representación más realista del comportamiento del puente bajo cargas dinámicas.

Dado que el modelo muestra una mayor precisión a velocidades de tren más altas, se aconseja a los ingenieros y profesionales encargados del mantenimiento utilizar los resultados de la simulación con precaución al evaluar el comportamiento del puente bajo condiciones de tráfico lento o estático. Se deben implementar inspecciones periódicas y pruebas de carga para monitorear continuamente el estado del puente y validar la precisión del modelo en diversas condiciones operativas.

Del análisis de los resultados obtenidos del impacto del agrietamiento por fatiga se derivan las siguientes recomendaciones:

Se recomienda realizar estudios adicionales que consideren la modelación de grietas en diferentes ubicaciones y direcciones dentro de la estructura. Este análisis permitiría comprender mejor cómo las grietas en diferentes puntos del puente pueden afectar la distribución de esfuerzos y deformaciones, ampliando el alcance del estudio y proporcionando una visión más completa de la integridad estructural.

Además, se sugiere investigar los efectos a largo plazo de la fatiga y las grietas en la estructura del puente. Este tipo de estudio podría incluir simulaciones de ciclos de carga repetidos a lo largo del tiempo para evaluar la progresión del daño y su impacto acumulativo en la estructura, lo que permitiría anticipar fallos y planificar mantenimientos preventivos.

Del análisis de los resultados obtenidos del impacto de la corrosión se derivan las siguientes recomendaciones:

Es imperativo implementar un sistema de monitoreo continuo en las áreas de corrosión 1 y 4. Estas zonas han demostrado los mayores incrementos de esfuerzos y, por ende, son las más vulnerables a la degradación estructural. Este monitoreo permitirá detectar incrementos anómalos en los esfuerzos, facilitando intervenciones preventivas antes de que se produzcan fallos estructurales. Esta recomendación está dirigida al Departamento de Mantenimiento de Infraestructura correspondiente.

Se recomienda evaluar periódicamente la vida útil de los elementos estructurales afectados por la corrosión y planificar actividades de rehabilitación específicas para las áreas más deterioradas. Esta evaluación periódica asegurará que la estructura permanezca segura y funcional a lo largo del tiempo, permitiendo la planificación anticipada de las actividades de mantenimiento y rehabilitación necesarias.

Es crucial iniciar proyectos de investigación para desarrollar y probar nuevos métodos de mitigación de la corrosión en puentes de acero. La implementación de métodos innovadores para mitigar la corrosión puede ofrecer soluciones efectivas a largo plazo, minimizando la necesidad de intervenciones de mantenimiento frecuentes y costosas.

Del análisis de los resultados obtenidos del impacto del daño en los apoyos en la estructura se derivan las siguientes recomendaciones:

Se recomienda a departamentos de investigación llevar a cabo estudios adicionales para evaluar la efectividad y los efectos de los apoyos fijos en diferentes tipos de puentes y estructuras. Este análisis puede incluir pruebas experimentales y simulaciones con variaciones en el diseño y materiales de los puentes.

Basado en los hallazgos, se sugiere desarrollar modelos predictivos que permitan evaluar y predecir los daños en los apoyos de los puentes bajo diferentes condiciones de carga. Estos modelos pueden ser utilizados por ingenieros estructurales para planificar el mantenimiento preventivo y realizar intervenciones oportunas.

Es recomendable realizar estudios complementarios que ahonden en el impacto específico de las cargas térmicas y de viento en la estructura de los puentes. Estos estudios pueden incluir experimentos en condiciones controladas y análisis numéricos más detallados para comprender mejor cómo estas cargas afectan la integridad estructural.

Con relación a situaciones por atender que se hallaron podrían ser riesgosas o requieren atención, se identificó que las grietas en el nodo 2972 de la viga derecha causan deformaciones significativamente mayores, lo que puede comprometer la integridad estructural del puente. Es recomendable implementar un sistema de monitoreo continuo en las grietas más pronunciadas, especialmente en las ubicadas en zonas centrales, para evaluar el progreso del daño por fatiga. Esto es esencial para prevenir fallos estructurales y evitar riesgos operativos. Esta recomendación va dirigida al equipo de Mantenimiento de Estructuras encargado de la infraestructura del puente.

Las áreas corroídas, especialmente la corrosión en las áreas 1 y 4, muestran incrementos significativos en los esfuerzos y deformaciones, lo que pone en riesgo la estabilidad de la estructura. Se recomienda realizar una intervención inmediata para rehabilitar estas áreas críticas mediante la sustitución o refuerzo de los elementos corroídos. Además, es necesario aplicar recubrimientos anticorrosivos adicionales para prevenir un mayor deterioro.

El análisis ha mostrado que el cambio de apoyo de rodillo a fijo, junto con la carga térmica y de viento, genera concentraciones de esfuerzos que podrían provocar fallos. Se recomienda llevar a cabo una revisión exhaustiva de los apoyos actuales y considerar la instalación de dispositivos de mitigación, como apoyos móviles o juntas de expansión, para gestionar de manera adecuada las cargas dinámicas.

Es fundamental implementar un monitoreo constante en las áreas cercanas a los apoyos y juntas de expansión, donde se ha identificado la lixiviación como un factor que contribuye a la corrosión y al debilitamiento de la estructura. Estas zonas son particularmente vulnerables debido a la infiltración de agua, que acelera la degradación del material y puede comprometer la estabilidad del puente. Se recomienda instalar sensores de humedad y sistemas de alerta temprana que permitan detectar la acumulación de agua y la progresión de la lixiviación. Este monitoreo debe ser prioritario y dirigido al Departamento de Mantenimiento de Infraestructuras para garantizar intervenciones preventivas oportunas, evitando un mayor deterioro y posibles fallos estructurales.

Referencias

- Abbas, M., & Shafiee, M. (2018). Structural Health Monitoring (SHM) and Determination of Surface Defects in Large Metallic Structures using Ultrasonic Guided Waves. *Sensors* 2018, Vol. 18, Page 3958, 18(11), 3958. <https://doi.org/10.3390/S18113958>
- Adey, R., Peratta, A., Baynham, J., & Curtin, T. (2019). Predicting Cumulative Galvanic Corrosion Damage in Aircraft Structures Using Environmental Exposure Measurements. *Corrosion*. <https://doi.org/>
- Alshoabi, A. M. (2023). Fatigue Crack Growth Analysis in Modified Compact Tension Specimen with Varying Stress Ratios: A Finite Element Study. *Applied Sciences*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/app132413160>
- American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA). (2015). Manual for Railway Engineering. Lanham, MD., Chapter 5.
- ASM International. (2019). *Metallography, Microstructure & Analysis* (Ryan M. Deacon, Ed.; 1st ed., Vol. 13). Springer. <https://www.asminternational.org/ims/resources/metallography-microstructure-analysis/>
- Bijen, J. (2003). Durability of engineering structures : design, repair and maintenance. *Durability of Engineering Structures*. <https://doi.org/10.1201/9780203486306>
- Carden, E. P., & Fanning, P. (2004). Vibration Based Condition Monitoring: A Review. <Http://Dx.Doi.Org/10.1177/1475921704047500>, 3(4), 355–377. <https://doi.org/10.1177/1475921704047500>
- Chatterjee, S. (2008). The Design of Modern Steel Bridges Second Edition. *Blackwell Science Ltd, ISBN 0-632-05511-1*.
- Cheng, W.-S. ;, Chen, G.-Y. ;, Shih, X.-Y. ;, Elsisi, M. ;, Tsai, M.-H. ;, Dai, H.-J., Dawson, W., Cheng, W.-S., Chen, G.-Y., Shih, X.-Y., Elsisi, M., Tsai, M.-H., & Dai, H.-J. (2022). Vickers Hardness Value Test via Multi-Task Learning Convolutional Neural Networks and Image Augmentation. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 10820, 12(21), 10820. <https://doi.org/10.3390/APP122110820>
- Chopra, A. K. (2011). *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering Fourth eDition GlobAl eDition* (Vol. 4). Pearson.
- Ciolko, A. T. (2005). Corrosion and Prestressed Concrete Bridges. *Proceedings of the Structures Congress and Exposition*, 1–12. [https://doi.org/10.1061/40753\(171\)17](https://doi.org/10.1061/40753(171)17)
- Cunha, A., Caetano, E., Magalhães, F., & Moutinho, C. (2013). Recent perspectives in dynamic testing and monitoring of bridges. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(6), 853–877. <https://doi.org/10.1002/STC.1516>
- Eid, N., El-Arabaty, H., Elmekawy, S., & Mantawy, O. (2021). DYNAMIC RESPONSE OF INCLINED BRIDGE SPANS DUE TO VEHICLE VIBRATIONS. *Civil Engineering Magazine Archive*, 43, 49.
- EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. (2004).

- Falah, M. W., & Muteb, H. (2023). Applying different soil stabilization mechanisms: a review. *Archives of Civil Engineering*, 69(4), 339–358. <https://doi.org/10.24425/ACE.2023.147663>
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2010). An introduction to structural health monitoring. *CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures*, 520, 1–17. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0399-9_1/COVER
- Fei, Q. G., Xu, Y. L., Ng, C. L., Wong, K. Y., Chan, W. Y., & Man, K. L. (2011). STRUCTURAL HEALTH MONITORING ORIENTED FINITE ELEMENT MODEL OF TSING MA BRIDGE TOWER. <https://doi.org/10.1142/S0219455407002502>, 7(4), 647–668.
- Geißler, K., Graße, W., Schmachtenberg, R., & Stein, R. (2002). *Measurement based determination of braking and traction forces at the railway bridge in Rendsburg*. 71, 735–747.
- Giannadakis, K., & Varna, J. (2009). Effect of thermal aging and fatigue on failure resistance of aerospace composite materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 5. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/5/1/012020>
- Glöckner, M., & Vodehnal, L. (2018). *STATICKÁ A DYNAMICKÁ OVĚŘOVACÍ ZKOUŠKA MOSTU V TU 206, KM 2,512 – ZÁBĚHLICE Vyhodnocení měření metodou radarové interferometrie*.
- Guo, S., Si, R., Dai, Q., You, Z., Ma, Y., & Wang, J. (2019). A critical review of corrosion development and rust removal techniques on the structural/environmental performance of corroded steel bridges. *Journal of Cleaner Production*, 233, 126–146. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.06.023>
- Jan Havíř. (2024). *Analýza porušení železničního mostu v Kojetíně* [BAKALÁŘSKÁ PRÁCE]. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- Kawashima, K., & Penzien, J. (1979). Theoretical and experimental dynamic behaviour of a curved model bridge structure. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 7(2), 129–145. <https://doi.org/10.1002/EQE.4290070203>
- Kongshaug, S. S., Larssen, R. M., Hendriks, M. A. N., Kanstad, T., & Markeset, G. (2021). Load effects in reinforced concrete beam bridges affected by alkali–silica reaction—Constitutive modelling including expansion, cracking, creep and crushing. *Engineering Structures*, 245, 112945. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.112945>
- Langenbeck, P. (2014). Interferometry for precision measurement. *Interferometry for Precision Measurement*, 1–244. <https://doi.org/10.1117/3.928443>
- Lebet, J. P., Hirt, M. A., & Couchman, G. (2013). Steel bridges: Conceptual and structural design of steel and steel-concrete composite bridges. *Steel Bridges: Conceptual and Structural Design of Steel and Steel-Concrete Composite Bridges*, 1–535. <https://doi.org/10.1201/B15429/STEEL-BRIDGES-MANFRED-HIRT-JEAN-PAUL-LEBET>
- Leonard, S. J., & Solnosky, R. (2023). Guiding Mass Timber Design and Research: A Parametric Modeling Approach to Understanding Impacts. *Structures Congress 2023 - Selected Papers from the Structures Congress 2023*, 230–246. <https://doi.org/10.1061/9780784484777.021>
- Li, Z. X., Chan, T. H. T., & Ko, J. M. (2001). Fatigue damage model for bridge under traffic loading: application made to Tsing Ma Bridge. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 35(1), 81–91. [https://doi.org/10.1016/S0167-8442\(00\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8442(00)00051-3)

- Lin, Weiwei., & Yoda, Teruhiko. (2017). *Bridge engineering : classifications, design loading, and analysis methods*. Elsevier, Butterworth-Heinemann,.
- Macho, M., & Ryjaček, P. (2015). The impact of the severe corrosion on the structural behavior of steel bridge members. *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies-Proceedings of the International Conference on Engineering Sciences and Technologies*, 123–128.
- Metallography, Microstructure & Analysis | International Metallographic Society*. (n.d.). Retrieved April 24, 2024, from <https://www.asminternational.org/ims/resources/metallography-microstructure-analysis/>
- Mora, S., & Yasuda, S. (2011). Licuefacción de suelos y fenómenos asociados durante el Terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central*. <https://doi.org/10.15517/RGAC.V010.13442>
- Moreu, F., Rakoczy, A. M., & Sanei, M. (2023). Lateral Loads and Displacements of Railroad Bridges from Field Investigations. *Journal of Bridge Engineering*, 28(9), 04023059. <https://doi.org/10.1061/JBENF2.BEENG-5982>
- Ni, Y. Q., Ye, X. W., & Ko, J. M. (2010). Monitoring-Based Fatigue Reliability Assessment of Steel Bridges: Analytical Model and Application. *Journal of Structural Engineering*, 136(12), 1563–1573. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000250](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000250)
- Nitish, & Singh, A. K. (2024). A FOPID based decentralised control system for vibration control of railway vehicle using hybrid optimisation. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 31(1), 113–146. <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2024.136244>
- Otter, D. E. (2001). DEVELOPMENT OF GUIDELINES FOR LONGITUDINAL FORCES IN BRIDGES. *Railway Track and Structures*, 97(2).
- Pan, Y., Agrawal, A. K., Ghosn, M., & Alampalli, S. (2009). Seismic Fragility of Multispan Simply Supported Steel Highway Bridges in New York State. I: Bridge Modeling, Parametric Analysis, and Retrofit Design. *Journal of Bridge Engineering*, 15(5), 448–461. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000085](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000085)
- Peng, X., Yang, Q., Qin, F., & Sun, B. (2023). Structural Damage Detection Based on Static and Dynamic Flexibility: A Review and Comparative Study. *Coatings 2024, Vol. 14, Page 31*, 14(1), 31. <https://doi.org/10.3390/COATINGS14010031>
- Picas, I., Cuadrado, N., Casellas, D., Goez, A., & Llanes, L. (2010). Microstructural effects on the fatigue crack nucleation in cold work tool steels. *Procedia Engineering*, 2(1), 1777–1785. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2010.03.191>
- Quispe, E., Fredy, J., Hualpa, S., Agosto, J., Baca, A., & Joseph, J. (2023). *Implementación y estimación de la incertidumbre de un módulo de durómetros portátiles para evaluar la dureza superficial de componente mecánicos según las normas ASTM A-956 y ASTM A-1038 para el laboratorio de materiales de la EPIMMEM de la UCSM*. Universidad Católica de Santa María. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12447>
- Rakoczy, A., & Nowak, A. (2018, April). *Live Load Spectra for Railway Bridges in USA*.
- Reis, A. J., & Pedro, J. J. O. (2019a). *Bridge Design*. <https://doi.org/10.1002/9781118927595>
- Reis, A. J., & Pedro, J. J. O. (2019b). *Bridge design : concepts and analysis* (First edition). Wiley,.
- Reyes, B., Marmolejo, M., & Salom, Y. (2018). *Ensayo de Tenacidad o Impacto (Prueba Charpy)*. <https://www.researchgate.net/publication/328051292>

- Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S. (2021). Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, 269. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121240>
- Ryjáček, P. (2017). *Zpráva o provedení tvrdoměrných zkoušek*.
- Ryjáček, P., & Fakulta Strojní ČVUT. (2017). *Zpráva o provedení materiálových zkoušek*.
- Ryjáček, P., & Lakmayer, Z. (2018). *Přepočty mostních objektů*.
- Ryjáček, P., Polák, M., Vodehnal, L., & Glöckner, M. (2018). *STATICKÁ A DYNAMICKÁ OVĚŘOVACÍ ZKOUŠKA MOSTU V TU 206, KM 2,512 - ZÁBĚHLICE*.
- Ryjáček, P., & Vůjtěch, J. (2017). *Zpráva o provedení diagnostického a korozního průzkumu*.
- Sanayei, M., & Onipede, O. (2012). Damage assessment of structures using static test data. *https://doi.org/10.2514/3.10720*, 29(7), 1174–1179. <https://doi.org/10.2514/3.10720>
- Seo, J., & Linzell, D. G. (2013). Nonlinear Seismic Response and Parametric Examination of Horizontally Curved Steel Bridges Using 3D Computational Models. *Journal of Bridge Engineering*, 18(3), 220–231. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000345](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000345)
- Šrámek, V. (2017). *Protokol o podrobné prohlídce*.
- Susmel, L., & Askes, H. (2012). Modified Wöhler Curve Method and multiaxial fatigue assessment of thin welded joints. *International Journal of Fatigue*, 43, 30–42. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2012.01.026>
- Thomaidis, I. M., Camara, A., & Kappos, A. J. (2022). Dynamics and Seismic Performance of Asymmetric Rocking Bridges. *Journal of Engineering Mechanics*, 148(3), 04022003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0002074](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002074)
- Unsworth, J. F. (2017). Design and construction of modern steel railway bridges, second edition. In *Design and Construction of Modern Steel Railway Bridges, Second Edition*. <https://doi.org/10.1201/b22256>
- Viththagan, V., Wimalasiri, R. J., & Karunananda, P. A. K. (2023). Estimating Remaining Fatigue Life of Critical Members of Steel Railway Bridges using Fatigue Crack Growth Model. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 56(3), 33–41. <https://doi.org/10.4038/ENGINEER.V56I3.7571>
- Vůjtěch, J., & Ryjáček, P. (2017). *Diagnostické průzkumy mostních objektů (Fotodokumentace)*.
- Woodward, R., CULLINGTON, D. W., DALY, A. F., VASSIE, P. R., HAARDT, P., KASHNER, R., ASTUDILLO, R., VELANDO, C., Godart, B., & Cremona, C. (2001). *BRIDGE MANAGEMENT IN EUROPE (BRIME)-DELIVERABLE D14-FINAL REPORT*.
- Worden, K., Farrar, C. R., Manson, G., & Park, G. (2007). The fundamental axioms of structural health monitoring. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463(2082), 1639–1664. <https://doi.org/10.1098/RSPA.2007.1834>

Anexos

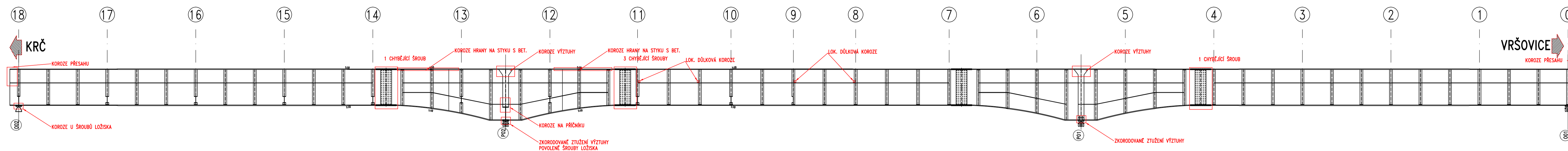
Anexo 1

Plano general de fallas y debilidades por corrosión, proporcionado por la Universidad Técnica Checa en Praga.

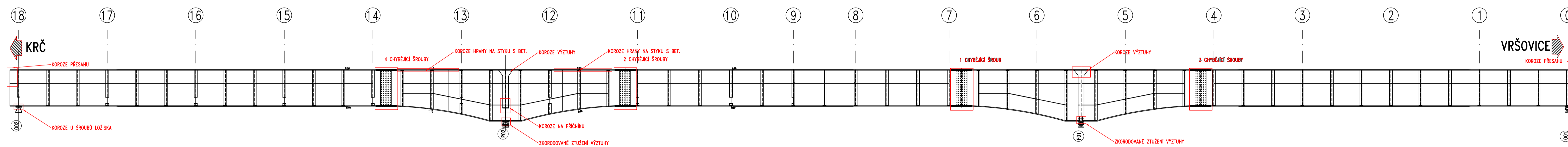
ANEXO 1

PŘEHLEDNÝ VÝKRES PORUCH A KOROZNÍHO OSLABENÍ

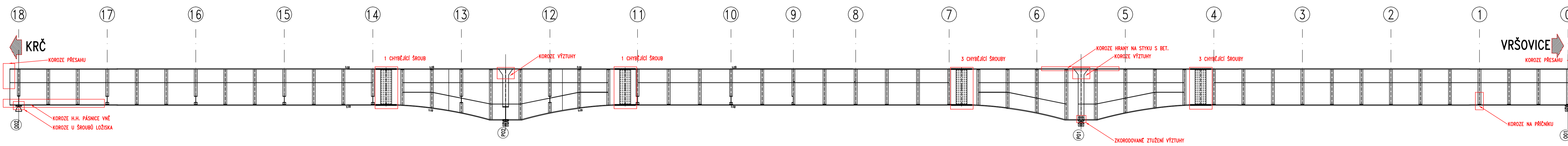
K01 HL. NOSNÍK – P



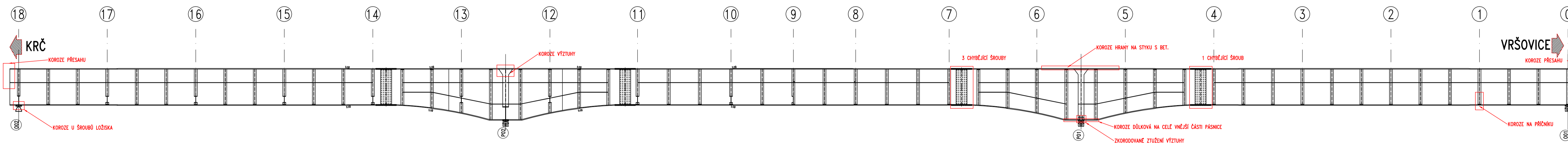
K01 HL. NOSNÍK – L



K02 HL. NOSNÍK – P



K02 HL. NOSNÍK – L



VÝŠKOVÝ SYSTÉM BpV		SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM S-JTSK	
Číslo změny:	Obsah změny:	Datum změny:	
01	-	-	
02	-	-	
03	-	-	
Objednatel:			
		Správa železniční dopravní cesty, s.o. Dlážděná 1003/7, 110 00 Praha 1	
Zpracovatel:			
		ČÚS - AKYUUS - AV OP AVOPPMS - AKAUOZO OESVSOVUCVCOOP - KEBCOOUOBUOOSUX OPASU-UUVWSO VP7SWUXGČ 166 29 PRAHA 6	
Vypracoval:		HIP:	
Ing. Jan Vůjtěch		doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.	
Název akce:		Číslo akce ČVUT:	
Metody expertního hodnocení železničních mostů a stanovení predikčních postupů (5003120024)		8301704A088	
Název části:		Stupeň dokumentace:	
B - Diagnostické průzkumy mostních objektů		UTR	
B.6 - Diagnostický průzkum mostu v TU 206, km 2,512 - Záběhlíce		Měřítko:	
-		Datum:	
-		11/2017	
Název přílohy:		Číslo přílohy:	
Přehledný výkres poruch a koroziního oslabení		B.6.1.2	