



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Monitoreo y evaluación estructural del puente El Carrizo

Luis Álvaro Martínez Trujano
Germán Michel Guzmán Acevedo
Miguel Anaya Díaz
Héctor Miguel Gasca Zamora
Mario Alberto Montes Zea
Jorge Alberto Hernández Figueroa
Adriana Guadalupe Porres López
José Manuel Machorro López
Juan Antonio Quintana Rodríguez
Francisco Javier Carrión Viramontes
Andrés Hernández Guzmán

Publicación Técnica No. 725
Querétaro, México
2023

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por M. en C. Luis Álvaro Martínez Trujano, M. en C. Germán Michel Guzmán Acevedo, Lic. Héctor Miguel Gasca Zamora, M. en C. Miguel Anaya Díaz, Ing. Andrés Hernández Guzmán, Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, Tec. Mario Alberto Montes Zea, M. en C. Adriana Guadalupe Porres López, Dr. José Manuel Machorro López, Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez y Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 07/22 *Monitoreo y evaluación estructural del puente El Carrizo*.

Se agradece la colaboración del Arq. Cesar Moreno Marrufo, Subgerente Técnico de la Unidad Regional Mazatlán; al Arq. Fernando de Jesús Plascencia Heredia, Auxiliar Técnico de la Subgerencia Técnica de la Unidad Regional Mazatlán; al Ing. Fernando J. Burela Hernández, Superintendente de Conservación en la Unidad Regional Mazatlán e Ing. Jesús Valdez Rojas, Superintendente de Conservación del tramo Sinaloa y su equipo de apoyo vial, de Caminos y Puente Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE); e Ing. Oscar Osiris Aguilar, de Euro Estudios S.A. de C.V. Se agradece la participación del Ing. Julio Guerrero López.

Tabla de Contenido

	Página
Sinopsis.....	iii
Abstract.....	v
Introducción.....	1
1. Puente El Carrizo.....	3
1.1 Sistema de monitoreo.....	5
2. Monitoreo del puente El Carrizo.....	9
2.1 Metodología.....	10
2.2 Mediciones en campo.....	10
3. Análisis de la información.....	19
3.1 Sección doble voladizo.....	19
3.1.1 Valor estadístico de deformación unitaria.....	19
3.1.2 Valor de referencia: deformación e inclinación.....	20
3.1.3 Centroide en dovelas instrumentadas.....	21
3.1.4 Análisis modal.....	23
3.2 Sección atirantada.....	27
3.2.1 Aceleraciones en tablero.....	27
3.2.2 Tensiones de cables.....	28
3.2.3 Análisis modal.....	36
4. Modelo de elementos finitos del puente el Carrizo.....	39
4.1 Actualización del MEF.....	40
5. Resultados.....	43

5.1	Sección doble voladizo.....	43
5.1.1	Valor estadístico de deformación unitaria	43
5.1.2	Valor de referencia: deformación e inclinación	53
5.1.3	Centroide en dovelas instrumentadas.....	63
5.1.4	Frecuencias naturales y amortiguamientos.....	68
5.2	Sección atirantada.....	68
5.2.1	Aceleraciones en tablero.....	68
5.2.2	Tensiones de cables.....	72
5.2.3	Frecuencias naturales y amortiguamientos.....	79
	Conclusiones.....	81
	Bibliografía	83
	Anexo 1.....	87
	Anexo 2.....	91
	Anexo 3.....	95

Sinopsis

En el presente estudio se describe el proceso de análisis y evaluación estructural para el seguimiento de los límites de operación normal, seguridad y servicio de los parámetros estructurales (deformación unitaria por carga viva y centroides) en las dovelas de la sección doble voladizo; así como, las frecuencias naturales, formas modales, aceleraciones máximas, aceleraciones medias y pesajes dinámicos indirectos en los 56 cables de la sección atirantada del puente El Carrizo. Para ello, se utilizó toda la información disponible del monitoreo realizado en 2018, 2021 y los datos obtenidos en sesiones periódicas de monitoreo en 2022.

Abstract

This study describes the structural analysis and evaluation process for monitoring the limits of normal operation, safety and service of the structural parameters (unitary strain due to live load and centroids) in the segments of the double cantilever section; as well as the natural frequencies, modal shapes, maximum accelerations, average accelerations and indirect dynamic weighing in the 56 cables of the cable-stayed section of the El Carrizo bridge. For this, all the information available from the monitoring carried out in 2018, 2021 and the data obtained in periodic monitoring sessions in 2022 were used.

Introducción

La Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) cuenta con el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CeMPEI), ubicado en el Instituto Mexicano del Transporte, mediante el cual se puede monitorear, procesar y analizar el comportamiento de parámetros estructurales y las respuestas dinámicas para evaluar la integridad estructural de cada uno de los puentes instrumentados de la red federal carretera. El éxito del monitoreo está en el análisis e interpretación de la información de los sensores que integran el sistema de monitoreo, la aplicación de metodologías de detección de daño y la implementación de planes de acción para conservar la integridad estructural, con lo que se garantiza la seguridad de los usuarios.

Para determinar la condición estructural de manera oportuna, que minimice los costos de mantenimiento, preserve la integridad del puente y garantice la seguridad de los usuarios, es importante el desarrollo de una estrategia de monitoreo, ya sea temporal o permanente, acorde a las particularidades de cada estructura, en la cual se procesen los datos de los sensores y mediante el análisis y evaluación de la información, se genere un plan de acción de corto, mediano y largo plazo, ante eventos o tendencias inusuales en los parámetros estructurales del puente o en situaciones extremas como accidentes viales. Para cumplir con estas expectativas es necesaria la comunicación y colaboración entre los responsables del monitoreo y las autoridades encargadas de la seguridad, el mantenimiento y conservación de la infraestructura carretera.

El Monitoreo de la integridad Estructural o SHM (*Structural Health Monitoring*, por sus siglas en inglés) es el proceso en el cual las estrategias de detección de daños son implementadas en las infraestructuras aero-espaciales, mecánicas y civiles (Sohn et al., 2004). Las primeras técnicas de monitoreo fueron efectuadas en las estructuras aero-espaciales, como naves espaciales y aviones, por la necesidad de monitorear las condiciones imperantes en el vuelo y emitir alertas tempranas si se detectan fallas; con el objetivo de salvaguardar la vida humana.

Desde los años sesenta del siglo pasado ya se aplicaban métodos de pruebas dinámicas de vibración libre o forzada para estudiar el comportamiento dinámico de las estructuras con especial énfasis en los edificios. En estos estudios de tipo académico se buscaba obtener los

períodos naturales de oscilación y la razón de amortiguamiento. Sin embargo, el tema propiamente de monitoreo de la integridad de la infraestructura civil no tomó fuerza sino hasta los comienzos de los años noventa debido a varias razones (Cheng, 2013):

- 1) La necesidad de determinar el estado de deterioro de las estructuras civiles de gran envergadura, ya que algunas se aproximan a la etapa final de su vida útil.
- 2) En términos de gestión, manejo y mitigación de las amenazas de los desastres, una base de datos que provee información sobre el estado de las estructuras civiles pre y post-desastre es crucial para la planificación y la toma de decisiones de las autoridades.
- 3) Cada vez hay más estructuras en el mundo como los puentes de gran tamaño o con características especiales que constituyen líneas vitales de tránsito para muchas ciudades. Su operación no puede ser interrumpida y garantizar su funcionamiento es un asunto crítico. Es necesario, entonces, un sistema de monitoreo continuo para detectar daños en tiempo real e implementar medidas correctivas a tiempo antes de que el daño se agrave o se extienda.

Todos estos hechos impulsaron un gran esfuerzo a nivel internacional en la investigación y se han tenido avances en detección de daño, sistemas de monitoreo basados en sensores de fibra óptica, sensores inalámbricos, sensores innovadores que emplean nuevos métodos de procesamiento de señales e identificación de parámetros dinámicos de las estructuras, entre otros. Sin embargo, dada la complejidad que se presenta en las estructuras civiles, aún hay muchos retos por enfrentar y problemas por superar.

1. Puente El Carrizo

El puente El Carrizo conecta la ruta entre el Golfo de México y la Costa del Pacífico, se localiza en Concordia, Sinaloa sobre el km. 162+702 de la autopista de cuota Durango-Mazatlán (figura 1.1). Este puente se considera como uno de los once puentes atirantados de la Red Federal Carretera y el segundo más importante de la carretera en donde se sitúa. El puente fue diseñado por JESA Ingeniería y construido por TRADECO Infraestructura, con inicio en marzo de 2011 y finalizando en marzo de 2013. El puente tiene una longitud total de 480 metros, con un claro principal de 217 metros. Está compuesto por tres tipos de estructuras: traveses tipo Nebraska, doble voladizo con vigas tipo cajón y una sección atirantada. La estructura con traveses tipo Nebraska postensadas tiene una longitud de 45 metros, la segunda estructura de 71 metros está formada por dovelas de concreto postensadas con sección transversal tipo cajón, en la cual, uno de sus lados sirve de apoyo para la estructura del atirantado y se encuentra trabajando en voladizo; finalmente, el tramo atirantado está compuesto por cuatro semi-arpas de 14 tirantes cada una de ellas, variando la cantidad de torones por tirante desde 22 hasta 43 elementos, la parte inferior del tablero está constituido por dovelas metálicas y en total tiene una longitud de 364 metros.



Figura 1.1 Fotografía del puente El Carrizo

El puente tiene un total de 487 metros de longitud, tomando en cuenta los apoyos, con un ancho de 18.4 metros y una altura máxima de 226 metros desde el desplante hasta la parte superior de la pila (Quintana et al., 2018).

Las figuras 1.2 y 1.3 muestran el plano del puente El Carrizo en vista de elevación y planta, respectivamente.

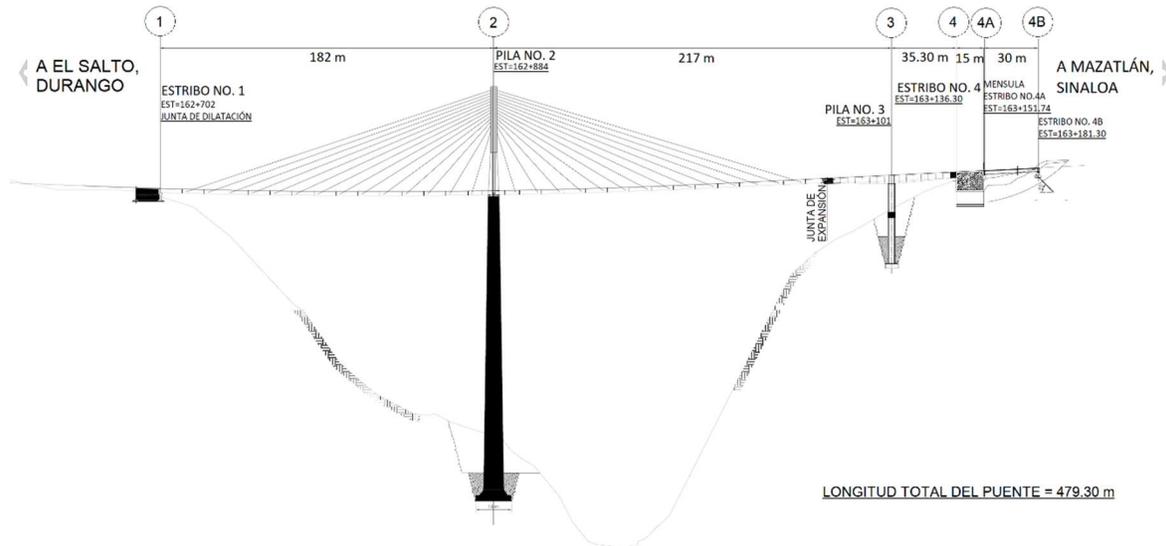


Figura 1.2 Plano del puente El Carrizo en vista de elevación

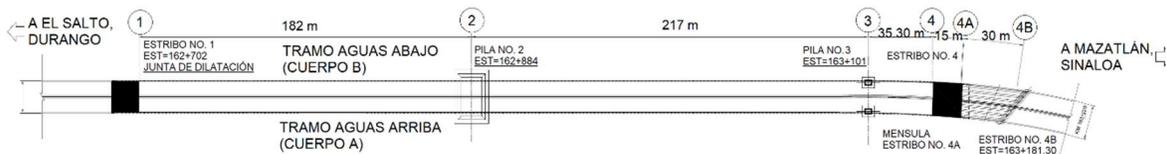


Figura 1.3 Plano del puente El Carrizo en vista de planta

El viernes 12 de enero de 2018 se suscitó un daño considerable en la superestructura del puente El Carrizo, en la sección de doble voladizo, como consecuencia de un accidente vial sobre el puente, en donde, se volcó e incendió el segundo remolque de un vehículo de carga que transportaba diésel. La volcadura provocó el derrame de aproximadamente 34 mil litros de combustible que tardaron aproximadamente 6 horas en extinguirse (Ramírez, 2021).

La figura 1.4 se observa una vista en detalle sobre la zona dañada de la estructura de doble voladizo.



Figura 1.4 Vista general de la sección doble voladizo del puente El Carrizo posterior al incendio

Posteriormente, personal de CAPUFE y Dirección General de Servicios Técnicos determinaron necesario abrir la circulación lo antes posible, por lo que se aprobó un plan de acción en dos etapas. La primera etapa consistió en rehabilitar el doble voladizo, efectuando la remoción y recuperación del acero de refuerzo y el concreto dañado en los cajones, la reparación y reforzamiento de los diafragmas, así como el postensado de cuatro cables adicionales y la fabricación de una superficie de rodamiento que sirvió de carril por cada cuerpo en ambas vigas tipo cajón, para de manera provisional, dar circulación antes del 23 de marzo de 2018. La segunda etapa se enfocó en la rehabilitación y adición de las piezas puente (vigas transversales de acero del tablero), así como la losa de concreto con el puente parcialmente en servicio, con el objetivo de llevarlo a la condición previa antes del siniestro.

1.1 Sistema de monitoreo

En 2018, durante las etapas de apertura parcial y rehabilitación del puente El Carrizo, el Instituto Mexicano del Transporte, a través del Grupo de Monitoreo Estructural, realizó la instrumentación con sensores de fibra óptica y monitoreo continuo, en tiempo real, de la sección del puente doble voladizo así como el diseño y ejecución de dos pruebas de carga, la primera para garantizar la capacidad estructural del paso provisional antes de su apertura al tránsito y la última prueba de carga, al finalizar las actividades de rehabilitación del doble voladizo, para asegurar la condición y seguridad estructural del puente (Quintana et al., 2018).

Para el monitoreo continuo se instalaron de manera permanente sensores de deformación unitaria tipo extensómetros, en ambos cuerpos, para medir las deformaciones unitarias en las dovelas No.1 y No. 4 tanto de lado Durango como de lado Mazatlán, siendo un par de sensores por cada dovela. Adicional, se instalaron inclinómetros y sensores de temperatura. La figura 1.5 muestra la ubicación de sensores en la dovela 4 del cuerpo A lado Durango.

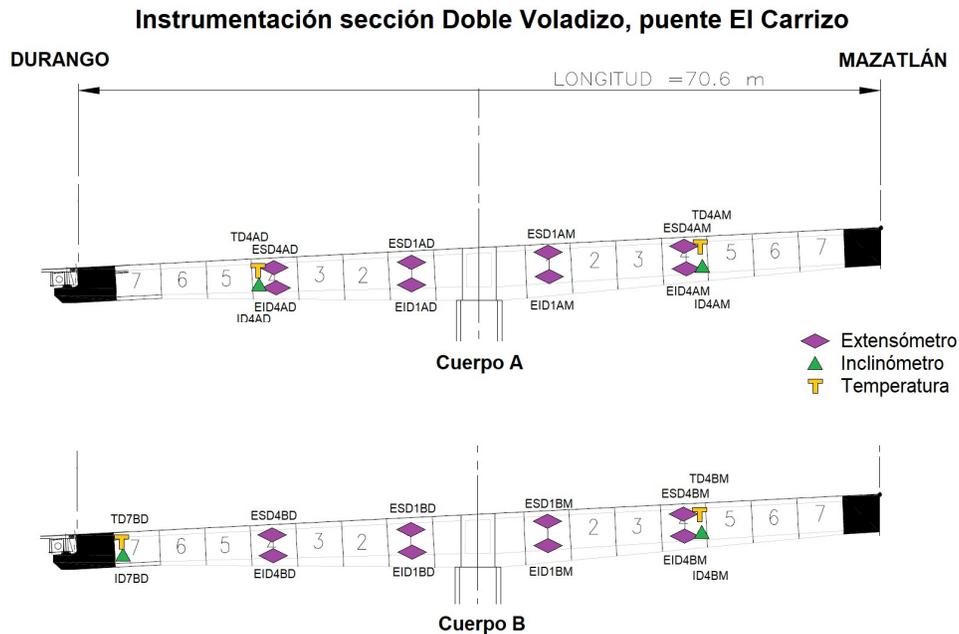


Figura 1.5 Ubicación de sensores en dovelas de la sección doble voladizo

Actualmente, el sistema de monitoreo temporal del puente El Carrizo consta de dos módulos: uno para la energización y otro la adquisición de datos. El primero provee energía eléctrica de manera temporal a los equipos de medición. El segundo, es el encargado de medir, registrar, procesar y almacenar la información proveniente de los sensores de fibra óptica.

Para la adquisición de datos se requiere de un ordenador para procesar y almacenar la información registrada por los sensores instalados en la estructura. La información se recibe en la computadora a través de un equipo de interrogación y otro equipo multiplexor para sensores de fibra óptica. El interrogador traduce los cambios de longitud de onda en parámetros como: deformaciones unitarias, inclinaciones y cambios de temperatura; mientras que el multiplexor expande los cuatro canales nativos del sistema en 16 (dieciséis) canales funcionales. La figura 1.6 muestra una distribución esquemática de los equipos que conforman al sistema de adquisición de datos.

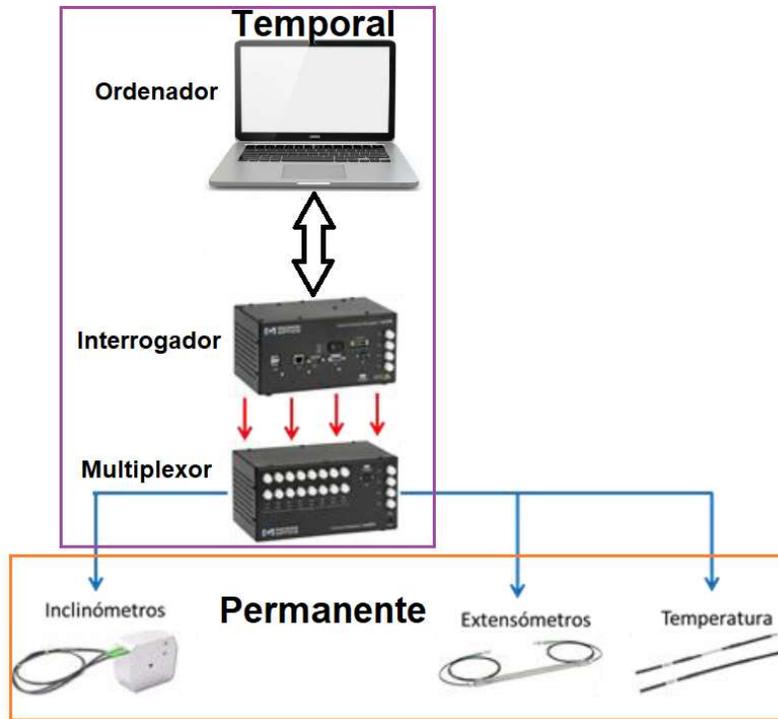


Figura 1.6 Sistema de adquisición de datos instalado en el puente El Carrizo

Los sensores de deformación para concreto son dispositivos que se utilizan para medir el comportamiento dinámico del puente, relacionar las deformaciones con las cargas de los vehículos y medir los cambios de deformación por temperatura durante el día o estación del año. La información proporcionada por estos sensores es fundamental para la calibración de modelos de elementos finitos, así como la implementación de técnicas de detección de daño.

Los inclinómetros tienen la finalidad de dar seguimiento al nivel de inclinación de las pilas durante el tiempo e identificar cuando hay un cambio significativo posterior a algún evento crítico, como puede ser un sismo o accidente.

Mediante los sensores de temperatura se obtiene información de los gradientes térmicos para correlacionar tales cambios, con las deformaciones en la estructura (Quintana et al., 2018).

En las tablas 1.1 y 1.2 se enlistan la cantidad de equipos, nombre, descripción de los componentes, marca, modelo y condición de la instalación, de los módulos de energización y de adquisición de datos, respectivamente.

Tabla 1.1 Módulo de energización

Cantidad	Nombre	Descripción	Marca	Modelo	Instalación
2	Batería 12 V	Batería 12 V tipo AGM con capacidad de 110 Ah	Powersonic	PS-121100B	Temporal
1	Inversor de voltaje	Equipo que convierte energía de 12 V en corriente directa (CD) a 120 V de corriente variable (AC)	Samlex Power	PST-600-12	Temporal

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.2 Módulo de adquisición de datos

Cantidad	Nombre	Descripción	Marca	Modelo	Instalación
1	Ordenador portátil	Equipo de cómputo para registro y almacenamiento de datos del monitoreo	Dell	Latitude	Temporal
1	Interrogador FBG	Equipo de adquisición de datos de fibra óptica de 4 canales con frecuencia de adquisición máxima de 1000 Hz	Micron Optics	sm-130	Temporal
1	Multiplexor FBG	Equipo que divide el haz de luz de los canales del interrogador para tener 16 canales	Micron Optics	sm-041	Temporal
16	Sensor de deformación unitaria en concreto	Sensor empleado para medir deformaciones unitarias en concreto	Micron Optics	os3600	Permanente
4	Sensor de inclinación	Sensor empleado para medir inclinaciones	FBG Tech	TI-310	Permanente
4	Sensor de temperatura	Sensor empleado para medir temperatura	Micron Optics	os4300	Permanente

Fuente: Elaboración propia.

En total, se encuentran instalados de manera permanente 24 sensores en la sección doble voladizo del puente El Carrizo, los cuales se distribuyeron en ocho canales de adquisición.

2. Monitoreo del puente El Carrizo

El puente El Carrizo se instrumentó de manera permanente con el fin de conocer la condición estructural en las etapas de rehabilitación de 2018, sin embargo, una vez instrumentado se incluyó dentro de las estructuras que el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CeMPEI) evalúa periódicamente bajo condiciones de tránsito normal, para determinar la condición estructural en la que se encuentra el puente El Carrizo.

Con el objetivo de evaluar la condición estructural del puente para proponer límites bajo condición de operación normal de la estructura, en el año 2020 se inició el proyecto EI 02/20 “Monitoreo estructural del puente el Carrizo”. En el proyecto se planeó realizar mediciones periódicas en el puente El Carrizo durante el año 2020 pero derivado de las indicaciones en la circular DG-02/2020 del IMT, a causa de la propagación del brote de neumonía denominado Coronavirus COVID-19, el 27 de abril de 2020 se decidió suspenderlo, y finalmente cancelarlo a causa de la reducción en un 75% el presupuesto del IMT, incluyendo la partida presupuestal prevista para viáticos, derivado del Decreto Presidencial.

Posteriormente, en 2021 se llevó a cabo el monitoreo del puente El Carrizo, como parte del proyecto EI 05/21 “Seguimiento y análisis del puente El Carrizo mediante monitoreo periódico”. El proyecto se planteó con los siguientes objetivos: evaluar la condición estructural de la sección doble voladizo bajo condiciones de operación normal para establecer los límites de operación de los parámetros estructurales de la sección doble voladizo y determinar las frecuencias naturales y formas modales de la sección atirantada para el desarrollo y calibración de un modelo matemático del puente El Carrizo (Martínez et al., 2022).

En 2022, se continuó con la estrategia de monitoreo periódico para mantener el seguimiento a la evaluación estructural de parámetros como: deformaciones unitarias, centroide e inclinaciones de las dovelas instrumentadas para la sección doble voladizo; así como frecuencias naturales, formas modales, amortiguamiento y tensión, a través de peajes indirectos, de los cables para la sección atirantada del puente bajo condiciones de operación de tránsito normal. Con los datos recabados del monitoreo, se mantiene actualizado el modelo de elementos finitos del puente El Carrizo.

2.1 Metodología

La ejecución del proyecto consiste básicamente en seis actividades principales:

1. Actualización de la base de información, en la cual, se completó la información del análisis y la evaluación de los valores de deformación unitaria por carga viva, centroides y ángulos de inclinación obtenidos al finalizar la rehabilitación del puente en 2018, con ello, se obtuvieron valores de referencia (baseline) de los parámetros estructurales de interés e información obtenida en las mediciones del 2021;
2. Desarrollo del plan de monitoreo temporal, en el cual, se incluyó la gestión con CAPUFE de los permisos para los acceso y mediciones en la estructura, las fechas y número de sesiones de medición durante 2022, el personal y los preparativos de equipos para los registros en la sección doble voladizo, así como la configuración complementaria de la instrumentación para la sección atirantada;
3. Mediciones en el puente, por cada sesión de medición en 2022 se obtienen los registros de los sensores de fibra óptica, para la sección doble voladizo, y los datos de aceleración en el tablero y cables de la sección atirantada;
4. Ejecución del análisis de la información del monitoreo y evaluación de la integridad del puente, posterior a las mediciones en campo, en gabinete, se efectuó el procesamiento de los datos de los sensores de fibra óptica, así como de los acelerómetros sobre el tablero y cables de la sección atirantada;
5. Actualización del modelo matemático del puente El Carrizo con los datos obtenidos en campo.
6. Seguimiento de los parámetros estructurales con los datos del monitoreo periódico y el modelo calibrado de elementos finitos.

2.2 Mediciones en campo

Con el fin de determinar el comportamiento estructural del puente El Carrizo, se realizaron tres sesiones de mediciones en campo durante el año 2022. La primera, se llevó a cabo del 8 al 10 de marzo, la segunda del 21 al 23 de junio y finalmente, del 20 al 22 de septiembre. Los registros del sistema de monitoreo de fibra óptica en la sección doble voladizo se realizaron durante 6 horas continuas por cada día de medición.

En la figura 2.1 se ilustra una vista general del gabinete instalado de manera permanente en 2018, al finalizar la rehabilitación de la estructura, dentro del gabinete se observan los equipos colocados temporalmente

durante la tercera sesión de mediciones de los módulos de energización y adquisición de datos del puente El Carrizo.



Figura 2.1 Vista general del gabinete de adquisición del puente El Carrizo

La figura 2.2 muestra una vista en detalle de la interconexión entre el interrogador (parte superior) y multiplexor (parte inferior) de fibra óptica durante las mediciones realizadas en la sección de doble voladizo.



Figura 2.2 Interconexión de interrogador y multiplexor en el puente El Carrizo

Cada sesión de medición en la sección doble voladizo se efectuó a una frecuencia de muestreo de 125 Hz para cada uno de los sensores instalados. El sistema almacena la información en el disco duro del ordenador en archivos de dos minutos de duración. Posteriormente se realiza el análisis de la información.

Adicional a la instrumentación permanente, se instalaron temporalmente acelerómetros en la sección doble voladizo y en el tablero del puente en el tramo atirantado para registrar las aceleraciones y con ello, identificar frecuencias naturales y modos de vibrar de la estructura. Así como en cada uno de los 56 cables que integran las cuatro semi-arpas, para a través de la respuesta dinámica dar seguimiento a la tensión axial de los tirantes.

La estructura doble voladizo fue instrumentada con seis acelerómetros, ubicados por pares sobre cada extremo y al centro del puente (figura 2.3).

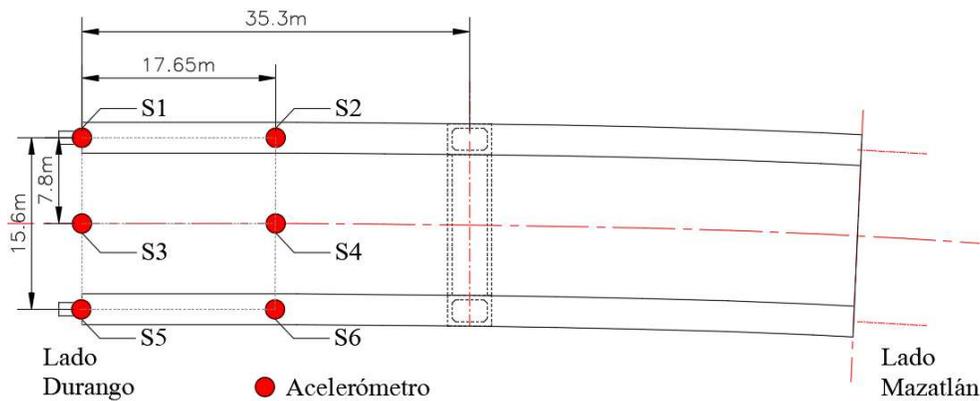


Figura 2.3 Instrumentación del doble voladizo (vista de planta)

La nomenclatura adoptada para el análisis de los sensores corresponde a la mostrada en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Nomenclatura de acelerómetros en sección doble voladizo

Nomenclatura	Cuerpo	Lado
S1	A	Durango
S2	A	
S3	-	
S4	-	
S5	B	
S6	B	

Fuente: Elaboración propia.

El monitoreo de la estructura se realizó bajo condiciones de excitación ambiental, las cuales obedecen al tráfico de vehículos sobre el puente y a la carga por viento. La frecuencia de muestreo utilizada para el monitoreo fue de 64 muestras por segundos (Hz) y se registraron 3 ejes por sensor, los cuales obedecen a las direcciones longitudinal, transversal y vertical. El tiempo de monitoreo del doble voladizo fue de 600 segundos. Las señales de aceleración del sensor S1 en las 3 direcciones se muestran en la figura 2.4.

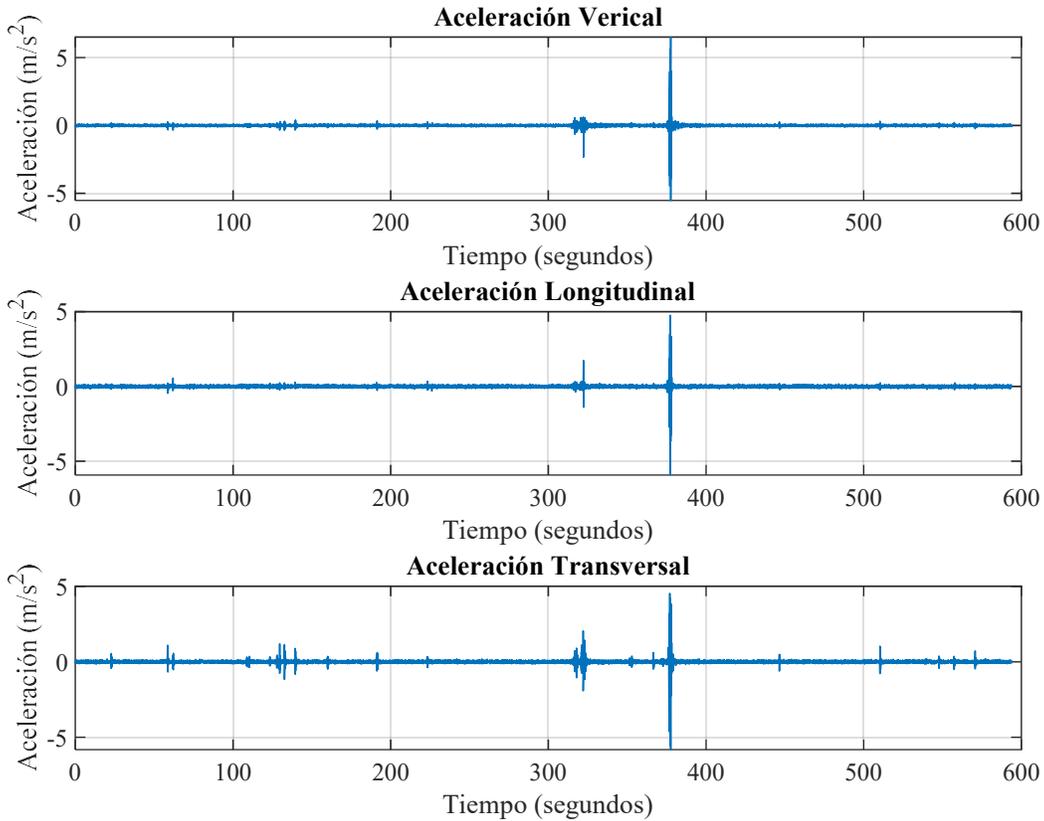


Figura 2.4 Señal del sensor S1 en las 3 direcciones del doble voladizo

La figura 2.5 indica la ubicación de los acelerómetros instalados temporalmente para el registro de las vibraciones en la sección atirantada del puente en vista de planta. Los círculos en color rojo representan los instrumentos instalados en el tablero.

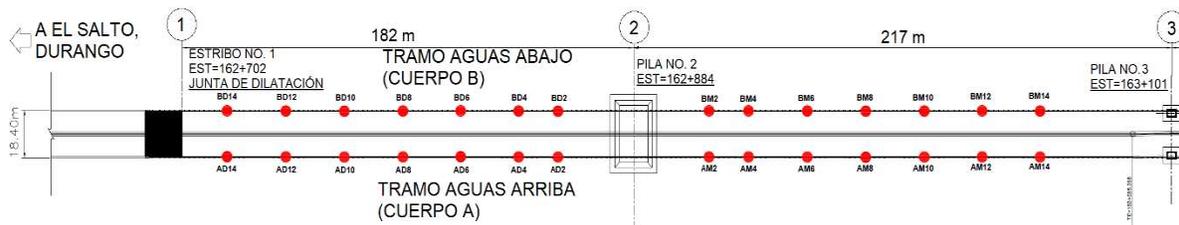


Figura 2.5 Ubicación temporal de acelerómetros en el tramo atirantado del puente El Carrizo (vista de planta)

La nomenclatura asignada a los acelerómetros en el tablero de la sección atirantada consta de tres elementos: el primero hace referencia al cuerpo A o B, el segundo al lado Durango o Mazatlán, y finalmente, al número del tirante en donde se instaló el sensor (tabla 2.2, tabla 2.3, tabla 2.4 y tabla 2.5).

Tabla 2.2 Nomenclatura de acelerómetros en tablero de la sección atirantada (Semi- arpa 1)

Semi- arpa	Sensor	Distancia a Estribo 1 (m)	Cuerpo	Lado	Tirante
1	AD14	14	A	Durango	14
	AD12	38			12
	AD10	62			10
	AD8	86			8
	AD6	110			6
	AD4	134			4
	AD2	158			2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.3 Nomenclatura de acelerómetros en tablero de la sección atirantada (Semi- arpa 2)

Semi- arpa	Sensor	Distancia a Estribo 1 (m)	Cuerpo	Lado	Tirante
2	AM2	206	A	Mazatlán	2
	AM4	230			4
	AM6	254			6
	AM8	278			8
	AM10	302			10
	AM12	326			12
	AM14	350			14

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.4 Nomenclatura de acelerómetros en tablero de la sección atirantada (Semi- arpa 3)

Semi- arpa	Sensor	Distancia a Estribo 1 (m)	Cuerpo	Lado	Tirante
3	BM2	206	B	Mazatlán	2
	BM4	230			4
	BM6	254			6
	BM8	278			8
	BM10	302			10
	BM12	326			12
	BM14	350			14

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.5 Nomenclatura de acelerómetros en tablero de la sección atirantada (Semi- arpa 4)

Semi- arpa	Sensor	Distancia a Estribo 1 (m)	Cuerpo	Lado	Tirante
4	BD14	14	B	Durango	14
	BD12	38			12
	BD10	62			10
	BD8	86			8
	BD6	110			6
	BD4	134			4
	BD2	158			2

Fuente: Elaboración propia.

La figura 2.6 indica la ubicación de los acelerómetros instalados temporalmente para el registro de las vibraciones en la sección atirantada del puente en vista de elevación. Los círculos en color rojo representan los instrumentos instalados en el tablero y los azules, en los cables.

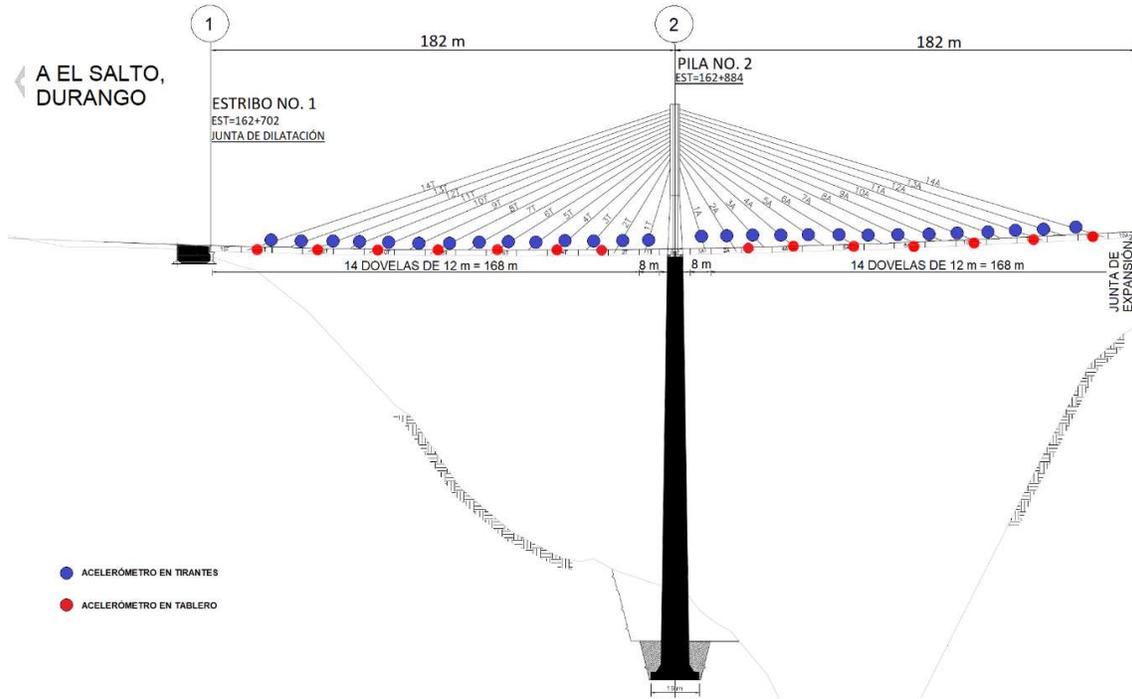


Figura 2.6 Ubicación temporal de acelerómetros en el tramo atirantado del puente El Carrizo (vista de elevación)

La nomenclatura para la identificación de los acelerómetros instalados en los tirantes corresponde a la semi-arpa y número de tirante. En donde, la semi-arpas se identificaron de acuerdo a la tabla 2.6, adicional se incluye la nomenclatura de identificación de semi-arpas que utiliza CAPUFE.

Tabla 2.6 Identificación de semi-arpa en el puente El Carrizo

Semi-arpa	IMT		CAPUFE	
	Cuerpo	Lado	Cuerpo	Lado
1	A	Durango	Aguas arriba	Tierra
2	A	Mazatlán	Aguas arriba	Agua
3	B	Mazatlán	Aguas abajo	Agua
4	B	Durango	Aguas abajo	Tierra

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2.7 se observa la instalación de instrumentos en los tirantes durante la actividad “Instalación de sensores en tirantes 8 al 14 de la pila 2, lado Durango del cuerpo A”.



Figura 2.7 Instalación de acelerómetros en los cables

En la figura 2.8 se muestra el registro de aceleraciones tanto en el tablero como en los cables de la sección atirantada del puente El Carrizo.



Figura 2.8 Registro de aceleraciones en tablero y tirantes

Las figuras 2.9 y 2.10 ilustran la ubicación del acelerómetro BD8 y BM2, respectivamente. El primero, colocado sobre el parapeto metálico del puente, cercano al tirante 8 del cuerpo B, lado Durango y el segundo, próximo al tirante 2, lado Mazatlán, durante el registro de aceleraciones en el tablero de la sección atirantada del puente El Carrizo.



Figura 2.9 Acelerómetro instalado en el cuerpo B, lado Durango



Figura 2.10 Acelerómetro instalado en el cuerpo B, lado Mazatlán

3. Análisis de la información

3.1 Sección doble voladizo

3.1.1 Valor estadístico de deformación unitaria

La información recabada en cada visita técnica fue analizada. Primero se realizó el análisis de los sensores de deformación unitaria, éstos presentan una mayor sensibilidad por el paso de vehículos de carga, mayormente de camiones de autotransporte, los cuales provocan efectos a tensión y compresión en las fibras de las dovelas instrumentadas (Quintana et al., 2020).

La figura 3.1 muestra la respuesta dinámica típica de un sensor de deformación por el paso de un vehículo, se puede observar en la figura, el valor a compresión y tensión registrado por el sensor. Para obtener la magnitud de la deformación por carga viva, el valor de deformación asociado a la línea de referencia es removido. Por cada día de medición y por cada sensor, se obtuvieron las amplitudes máximas de deformación de cada archivo. Posteriormente, las amplitudes registradas en cada sesión, compuesta por tres días continuos de medición, se concatenaron en un vector de datos para generar un histograma. Los fenómenos a tensión y los efectos a compresión de las cargas dinámicas se analizaron por separado.

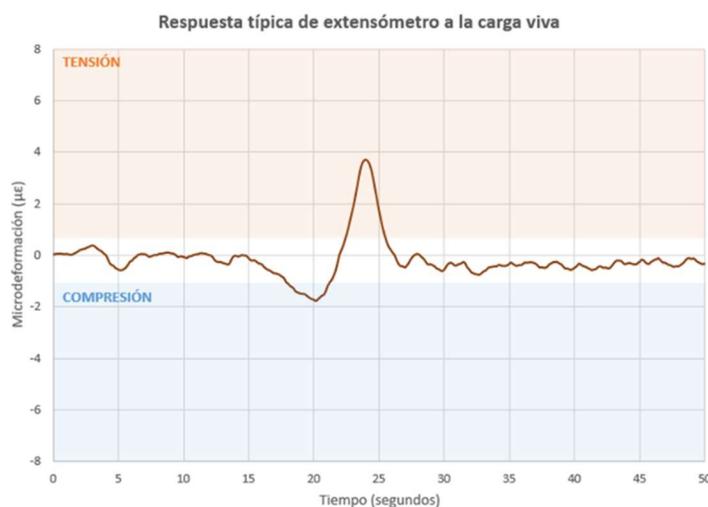


Figura 3.1 Respuesta dinámica típica en un sensor de deformación unitaria

Es preciso mencionar que, para efectuar el análisis, se utilizó el valor absoluto de las amplitudes máximas con el fin de obtener el mismo tipo de distribución de probabilidad entre los efectos a tensión y compresión.

En seguida, se realizó un ajuste de distribución de probabilidad al histograma de datos, utilizando como criterio el menor error chi-cuadrado para el ajuste de bondad. La distribución de probabilidad que representa el comportamiento de los efectos de cargas vivas en las zonas instrumentadas de las dovelas de la sección doble voladizo, continúa siendo el tipo Gauss Inversa.

Finalmente, con la distribución elegida, se calculó el valor de la media de deformación unitaria, tanto a tensión como a compresión, así como los límites superiores e inferiores bajo condición de operación normal de la estructura definido por los valores dentro del 98.76 % del percentil de los registros. El límite superior para efectos a tensión, se obtiene al agregar al valor de la media de deformación unitaria a tensión, 2.5 desviaciones estándar obtenidas del promedio de las desviaciones estándar de los registros a tensión en el periodo evaluado. De forma similar, el límite inferior para efectos a compresión, se genera al restar al valor de la media de deformación unitaria a compresión, 2.5 desviaciones estándar calculadas del promedio de las desviaciones estándar de los registros a compresión para el mismo periodo (Martínez et al., 2016) (Quintana et al, 2020).

En el Anexo 1 se presentan los histogramas con gráficas de barra en color azul y ajuste de distribución de probabilidad tipo Gauss Inversa con línea color naranja, del vector de amplitudes de deformación unitaria a compresión para las tres sesiones de mediciones en 2022. En el eje de abscisas se indica la deformación unitaria en microdeformaciones ($\mu\epsilon$), mientras que el eje de ordenadas, la frecuencia de la distribución de probabilidad (adimensional).

En el Anexo 2 se presentan los histogramas, con gráfica de barras en color azul, y respectivo ajuste de distribución de probabilidad tipo Gauss Inversa, línea color naranja, del vector de amplitudes de deformación unitaria a tensión para las tres sesiones de mediciones en 2022. En el eje de abscisas se indica la deformación unitaria en microdeformaciones ($\mu\sigma$), mientras que el eje de ordenadas, la frecuencia de la distribución de probabilidad (adimensional).

3.1.2 Valor de referencia: deformación e inclinación

Mediante el monitoreo periódico del puente El Carrizo se efectuó el seguimiento histórico del valor de referencia bajo condición de operación

normal, del comportamiento estructural de la sección doble voladizo, a través de los parámetros estructurales (deformación e inclinación) (Anaya et al., 2020).

El sistema de adquisición realiza muestreos a una frecuencia de adquisición de 125 Hz, por consiguiente, cada 8 milisegundos se registra un nuevo valor en cada sensor. La información adquirida se concatena en archivos de dos minutos con un total de 15,000 valores por cada sensor. Para el análisis del valor de referencia, por cada sensor, inicialmente se obtiene el promedio de cada archivo de dos minutos de información y posteriormente, con la información previa se calcula el promedio diario de los registros de dos minutos.

3.1.3 Centroide en dovelas instrumentadas

Como parte del seguimiento a los parámetros estructurales, se obtuvo el valor del centroide en las dovelas instrumentadas. En la figura 3.2 se visualiza una sección transversal de una dovela típica de la sección doble voladizo, en donde se incluyen la ubicación de los sensores de deformación unitaria, así como la línea de centroide teórico (Quintana et al., 2018).

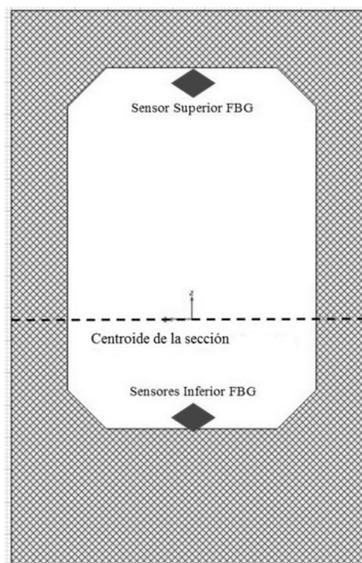


Figura 3.2 Vista de sección transversal de dovela

Para ello, primero se identifican los eventos extraordinarios por cargas vivas, los cuales son los registros de deformación unitaria que se encuentran fuera de los límites superiores e inferiores a tensión y compresión bajo condición de operación normal, obtenidos de los registros posteriores al fin de la rehabilitación en 2018, las dos sesiones de medición en 2021 y las tres sesiones de medición en 2022.

El centroide de la sección de la dovela analizada se calcula al aplicar la ecuación 3.1 en los registros de eventos extraordinarios por carga viva.

$$c = \left(\frac{|\varepsilon_2|}{|\varepsilon_1| + |\varepsilon_2|} \right) (h) \quad (3.1)$$

En donde, c representa el centroide, ε_1 es la amplitud máxima de deformación unitaria a tensión para la zona superior, ε_2 es la amplitud mínima a compresión para la parte inferior y h la altura, siendo 2.79 m y 2.49 m para las dovelas No. 1 y No. 4, respectivamente.

A manera de ejemplo, en la figura 3.3 se observa un evento extraordinario por carga viva, que transitó por el cuerpo B del puente El Carrizo con dirección a Durango, el 22 de septiembre de 2022.



Figura 3.3 Vista de vehículo de un evento extraordinario

En la figura 3.4 y 3.5 se observan las respuestas dinámicas debido al evento extraordinario mencionado anteriormente, en los sensores de deformación instalados en la dovela 1, lado Durango del cuerpo B, tanto en la parte superior de la dovela, amplitud máxima a tensión (ε_1) indicado con recuadro en color rojo, como en la parte inferior de la dovela, efecto a compresión (ε_2) mostrado en recuadro color azul, respectivamente. Adicional, la línea horizontal color verde representa la condición del sensor sin excitación por carga viva, mientras que la línea horizontal en color rojo indica el límite máximo de deformación por carga viva al 98.76% del percentil de los registros de deformación unitaria.

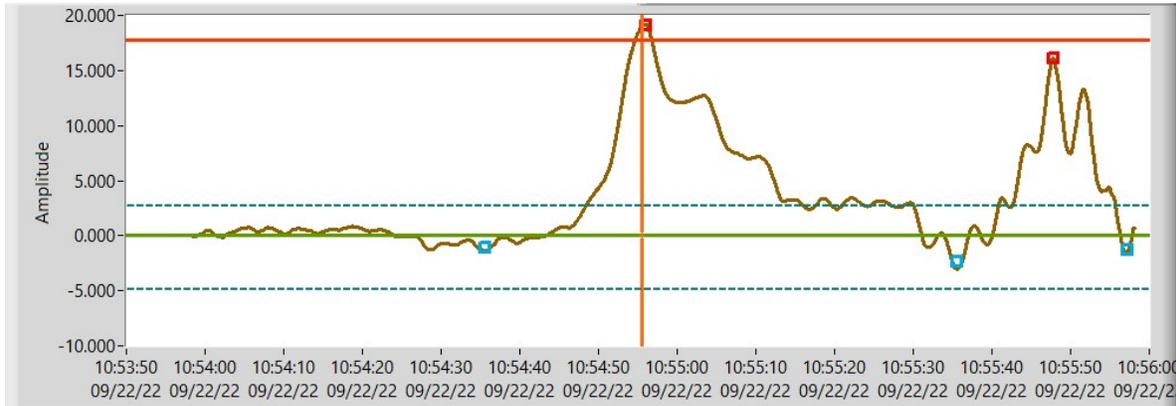


Figura 3.4 Respuesta dinámica en sensor ESD1BD

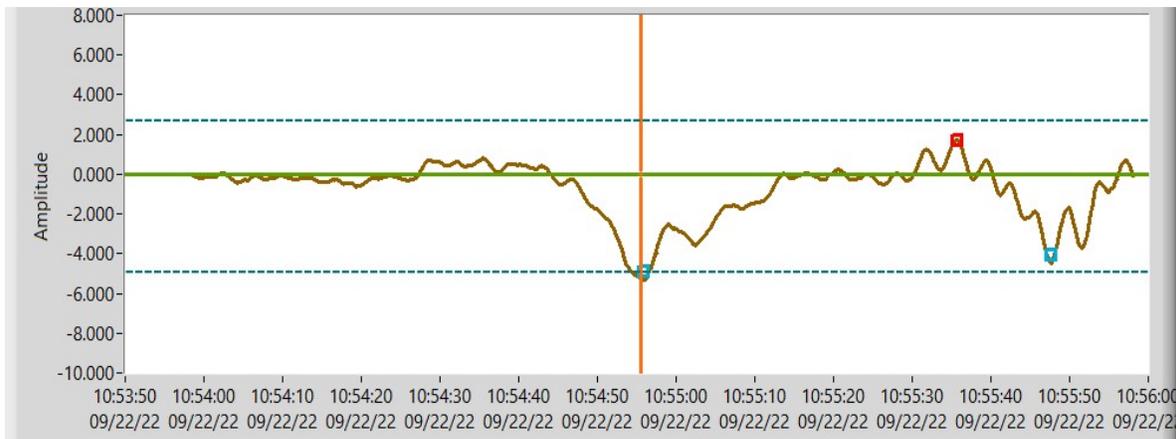


Figura 3.5 Respuesta dinámica en sensor EID1BD

3.1.4 Análisis modal

La técnica implementada para estimar y dar seguimiento a los parámetros modales es la Descomposición Mejorada en el Dominio de la Frecuencia (EFDD) (Brincker, Zhang & Andersen, 2000). Un esquema del proceso de análisis de las señales se muestra en la figura 3.6.

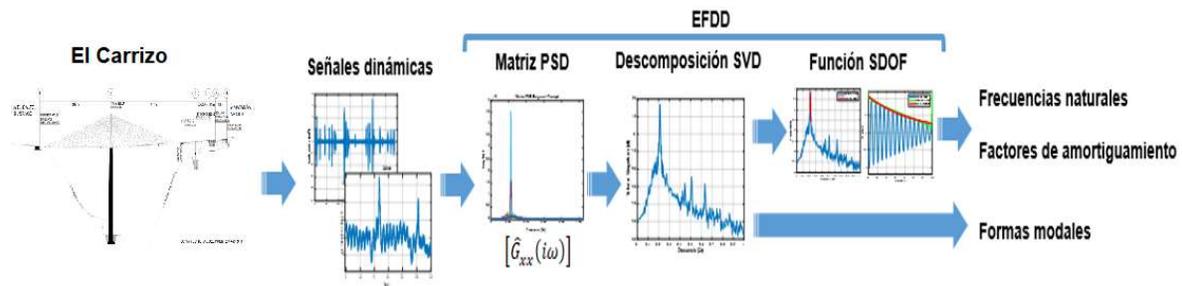


Figura 3.6 Esquema de la técnica EFDD

En la técnica EFDD, el primer paso es estimar la matriz de Densidad Espectral de Potencia (PSD), la cual se define como la relación que existe entre las fuerzas desconocidas $f(t)$ y las respuestas $x(t)$, y puede expresarse en la ecuación 3.2, como:

$$[\hat{G}_{xx}(i\omega)] = [\bar{H}(i\omega)][\hat{G}_{ff}(i\omega)][H(i\omega)]^T \quad (3.2)$$

Donde la matriz $G_{xx}(\hat{i}\omega)$ es de tamaño $m \times m$, siendo m el número de sensores, la matriz $G_{ff}(\hat{i}\omega)$ es de tamaño $r \times r$, siendo r el número de entradas y $H(i\omega)$ es la matriz FRF.

En el caso en el que las funciones de excitación sean ruido blanco y que el amortiguamiento del sistema sea ligero, la matriz PSD puede descomponerse en un conjunto de funciones de auto densidad espectral, cada una correspondiente a un sistema de un solo grado de libertad (SDOF) mediante la ecuación 3.3:

$$[\hat{G}_{xx}(i\omega)] = [U_i] [S_i] [U_i]^H \quad (3.3)$$

Donde la matriz $[U_i] = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$, es una matriz unitaria de vectores singulares, y $[S_i]$ es una matriz diagonal de valores singulares. En el caso de que solo un modo sea dominante en determinada frecuencia i , el vector singular será una estimación cercana a la forma modal indicada en la ecuación 3.4:

$$\hat{\phi} = u_{i1} \quad (3.4)$$

El siguiente paso consiste en estimar la función de auto densidad espectral correspondiente a un sistema SDOF, para obtener dicha función, se comparan los valores de los vectores singulares cercanos al pico con respecto a la forma modal $\hat{\phi}$. Mientras se encuentren vectores singulares con un valor MAC elevado, entonces los correspondientes valores singulares forman parte de la función SDOF. Una vez obtenidos los valores singulares que forman parte de la SDOF, estos son llevados de nuevo al dominio del tiempo a través de la transformada inversa de Fourier (IFFT), donde la frecuencia natural y el amortiguamiento son estimados mediante una regresión lineal de mínimos cuadrados.

Para calcular la matriz espectral $G_{xx}(\hat{i}\omega)$ se dividió cada señal en segmentos de 30 segundos, donde a cada uno de ellos se les aplicó una función de ventana tipo Hanning. Una vez aplicado el ventaneo, se calcula la Transformada de Fourier para posteriormente aplicar función de autocorrelación y correlación cruzada entre todos los sensores en determinado segmento de tiempo. Una vez calculadas todas las correlaciones para todos los segmentos de tiempo, se procede a promediarlos para obtener la matriz espectral.

En las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 se muestran los espectros de valores singulares obtenidos del análisis con la técnica EFDD para las direcciones vertical, longitudinal y transversal respectivamente. Como se puede observar en la figura 3.7, las frecuencias que se excitan, sobresalen del umbral de ruido, en forma de picos en el espectro, para la orientación vertical se visualizan frecuencias predominantes en un rango de 1 a 20 Hz. Para el caso de la dirección longitudinal, se puede observar en la figura 3.8 que las frecuencias dominantes se presentan en 17 y 30 Hz. Por último, para el caso de la dirección transversal, se puede ver en la figura 3.9 que las frecuencias naturales se encuentran en un rango de 9 a 20 Hz, encontrándose la frecuencia dominante próxima a 10 Hz.

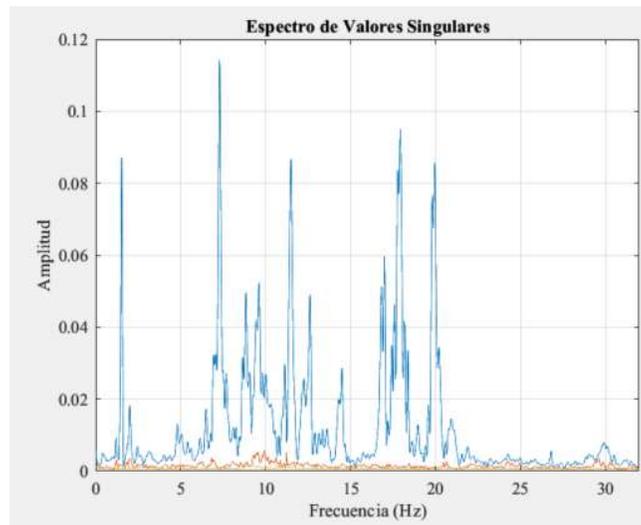


Figura 3.7 Espectro de Valores Singulares de la dirección vertical

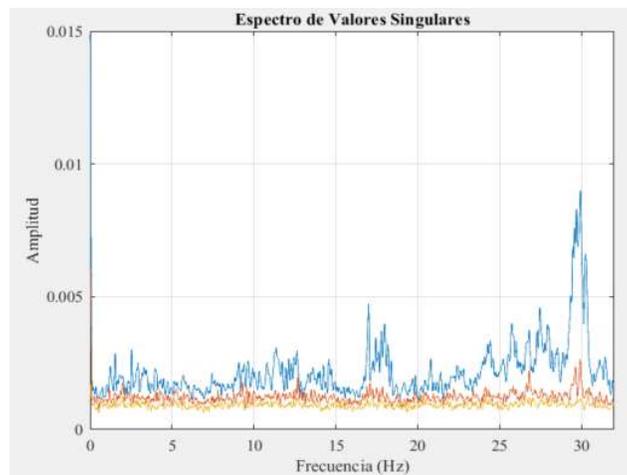


Figura 3.8 Espectro de Valores Singulares de la dirección longitudinal

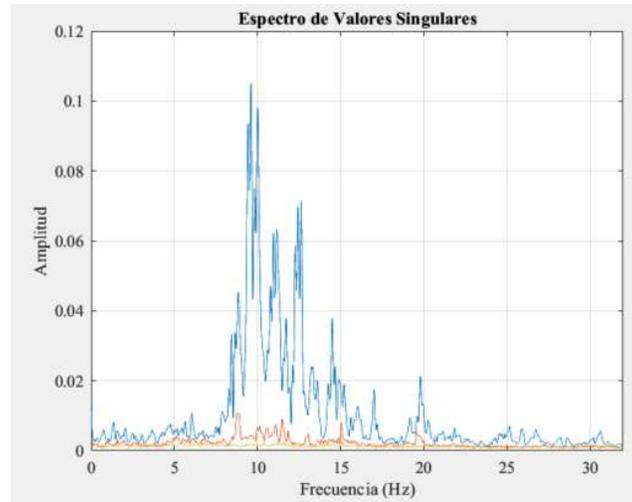


Figura 3.9 Espectro de Valores Singulares de la dirección transversal

Continuando con el análisis mediante la técnica EFDD, se procedió a estimar las frecuencias naturales y factores de amortiguamiento de los principales modos de vibrar del doble voladizo, para ello se utilizó el criterio MAC para identificar los valores pertenecientes a las funciones SDOF de los primeros 3 modos en la dirección vertical. En la figura 3.10, se aprecia la primera frecuencia natural, así como su correspondiente representación en el dominio del tiempo.

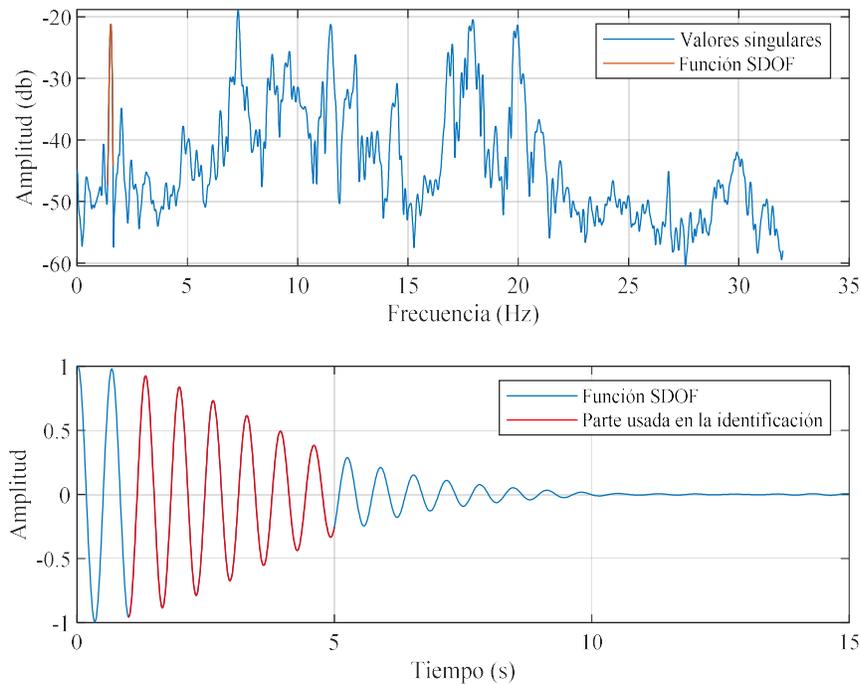


Figura 3.10 Función SDOF del primer modo de vibración del doble voladizo

3.2 Sección atirantada

3.2.1 Aceleraciones en tablero

Se analizaron las respuestas dinámicas en cada uno de los acelerómetros situados a la altura de los tirantes.

Los acelerómetros registran en las tres direcciones, los cuales se orientaron para almacenar información en las direcciones longitudinal, transversal y vertical, con respecto al flujo de los vehículos. Los sensores registraron información durante 10 minutos continuos por cada sesión de medición, acorde al comportamiento de tránsito normal.

Por cada sensor se obtuvieron las amplitudes máximas de aceleración en cada una de las tres direcciones. Para considerar un evento de aceleración, las amplitudes deben superar un umbral de 0.0125 g, nivel de ruido intrínseco del sistema electrónico de los acelerómetros. La figura 3.11 muestra el registro de aceleración en la dirección vertical en el sensor BM14, instalado a la altura del tirante 14 en el cuerpo B lado Mazatlán, que corresponde a la medición del 21 de septiembre de 2022. Durante el registro de la respuesta dinámica en ese punto, durante 10 minutos de monitoreo, se obtuvieron 34 eventos de aceleración representados con cuadros en color morado, en la misma gráfica se indica con línea segmentada en color naranja, el umbral de ruido que debe ser superado para que la amplitud de aceleración sea considerada como válida para posteriormente ser almacenada.

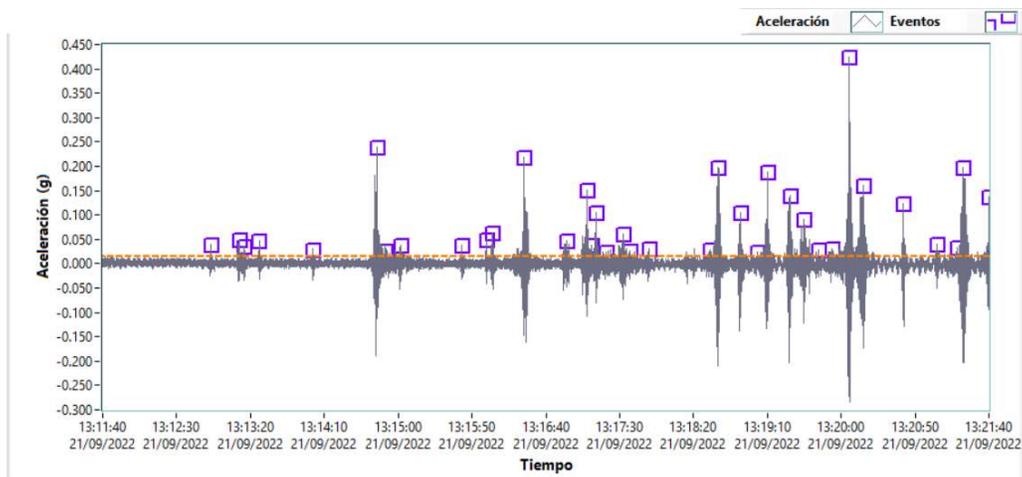


Figura 3.11 Detección de eventos de aceleración

Para cada sesión, se obtuvo la aceleración máxima en cada dirección por cada cuerpo del puente, así como el valor medio de aceleración de los eventos registrados.

3.2.2 Tensiones de cables

Ante la necesidad de evaluar el comportamiento de la tensión en los cables del puente El Carrizo, y de conocer la variación de estas tensiones a lo largo del tiempo, se utilizó un método indirecto, basado en mediciones de vibración dinámica, para calcular las tensiones a partir de la identificación de los primeros modos de vibrar de los tirantes (Irvine, 1992) (Carrión, López, Quintana y Lozano, 2008).

Este método indirecto resulta más rápido en obtener resultados con respecto al método tradicional (pesaje mecánico directo utilizando gatos hidráulicos). El pesaje indirecto requiere hasta tres días para la medición y estimación de la tensión de todos los tirantes de manera indirecta, mientras que, el pesaje mecánico directo, con gatos hidráulicos, puede requerir de casi un mes para determinar la tensión de los mismos tirantes. Adicionalmente, con el método directo existen limitaciones de control de tráfico y acceso al puente, lo cual también representa un costo mayor para obtener la misma información.

En general, de la medición directa con el acelerómetro, se obtiene la respuesta dinámica del tirante. A través del post-procesamiento de la señal se calcula la transformada de Fourier (FFT) para obtener el espectro en frecuencia, donde se observan los picos asociados a los modos característicos de vibrar del tirante (figura 3.12).

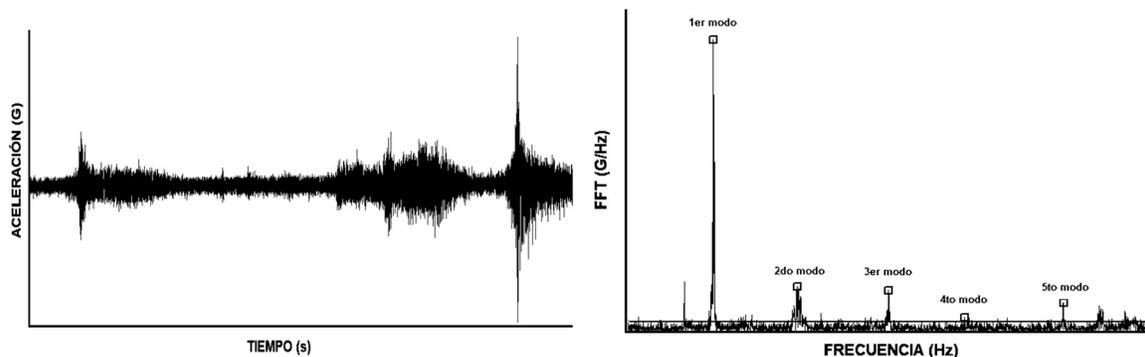


Figura 3.12 Izquierda, respuesta típica de aceleración de un tirante y derecha, Transformada de Fourier típica

A continuación, de manera general se describe el proceso utilizado para determinar la tensión de los cables:

Mediciones en campo

1. Se instaló el acelerómetro en dirección perpendicular al cable y se sujetó mediante correas tensadas para garantizar el contacto entre el acelerómetro y el tirante.
2. Se configuró el sistema de adquisición de datos de los acelerómetros con una frecuencia de adquisición de 128 Hz.
3. Se registró la respuesta dinámica del sistema durante 300 segundos continuos por cada tirante.

Post-procesamiento

4. Se obtuvo el espectro de frecuencia de la medición mediante el análisis de la respuesta dinámica.
5. Se calculó la frecuencia fundamental a través de la identificación de los primeros modos de vibrar de cada tirante.

Mediante la ecuación 3.5 se calcula la frecuencia fundamental de cada cable en función de sus modos de vibrar, que para el caso de cables también se les denomina armónicos.

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{\sum_{i=1}^n i} = \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_n}{1 + 2 + \dots + n} \quad (3.5)$$

En donde, f representa a la frecuencia fundamental del cable, en hertz (Hz); f_i es la frecuencia del i -ésimo armónico identificado del cable, en hertz (Hz); i representa al i -ésimo armónico; y n es el mayor armónico identificado.

En el Anexo 3 se presentan la frecuencia fundamental y los armónicos identificados en los tirantes 1 al 14, en las cuatro semi-arpa de la sección atirantada, de acuerdo a las tres sesiones de mediciones efectuadas en 2022.

Las tablas 3.1 a 3.4 muestran en hertz, las frecuencias fundamentales identificadas en los 56 cables que constituyen la sección atirantada del puente El Carrizo en las semi-arpas 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Los datos mostrados representan el compilado de las tres mediciones de aceleración efectuadas en 2022, así como la frecuencia media (μ), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación ($C.V.$) por cada cable. Cabe recordar que, la frecuencia fundamental se obtuvo a través del análisis espectral en los registros de aceleración en los tirantes, realizados en las tres sesiones de medición efectuadas en 2022.

Tabla 3.1 Frecuencias fundamentales, en hertz, identificadas en cables de la semi- arpa 1

Cable	9/mar/22	21/jun/22	20/sep/22	μ	σ	C.V.
1	2.359	2.270	2.344	2.325	0.048	2.1%
2	2.499	2.442	2.493	2.478	0.031	1.3%
3	1.974	1.941	1.982	1.966	0.022	1.1%
4	1.979	Sin registro	1.937	1.958	0.029	1.5%
5	1.646	1.624	1.637	1.636	0.011	0.7%
6	1.483	1.480	1.486	1.483	0.003	0.2%
7	1.089	1.094	1.103	1.095	0.007	0.7%
8	0.992	0.991	0.998	0.994	0.004	0.4%
9	0.922	0.919	0.920	0.920	0.001	0.1%
10	0.826	0.831	0.840	0.832	0.007	0.8%
11	0.941	Sin registro	0.958	0.949	0.012	1.3%
12	0.866	0.871	0.874	0.870	0.004	0.4%
13	0.815	0.814	0.812	0.814	0.002	0.2%
14	0.785	0.779	0.785	0.783	0.004	0.5%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.2 Frecuencias fundamentales, en hertz, identificadas en cables de la semi-
arpa 2**

Cable	9/mar/22	21/jun/22	20/sep/22	μ	σ	C.V.
1	2.339	2.334	2.392	2.355	0.032	1.4%
2	2.388	2.434	2.417	2.413	0.023	0.9%
3	2.034	2.033	2.018	2.028	0.009	0.4%
4	1.712	Sin registro	1.722	1.717	0.007	0.4%
5	1.390	1.394	1.409	1.398	0.010	0.7%
6	1.290	1.299	1.284	1.291	0.008	0.6%
7	1.404	1.418	1.411	1.411	0.007	0.5%
8	1.076	1.088	1.087	1.084	0.006	0.6%
9	0.837	0.843	0.843	0.841	0.003	0.4%
10	0.839	0.844	0.840	0.841	0.003	0.3%
11	0.959	Sin registro	0.962	0.960	0.002	0.2%
12	0.854	0.853	0.851	0.853	0.002	0.2%
13	0.767	0.762	0.766	0.765	0.003	0.4%
14	0.840	0.837	0.826	0.834	0.007	0.9%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.3 Frecuencias fundamentales, en hertz, identificadas en cables de la semi-
arpa 3**

Cable	9/mar/22	21/jun/22	20/sep/22	μ	σ	C.V.
1	1.747	1.751	1.768	1.755	0.011	0.6%
2	2.335	2.330	2.345	2.337	0.008	0.3%
3	2.036	2.004	2.021	2.020	0.016	0.8%
4	1.864	Sin registro	1.910	1.887	0.033	1.7%
5	1.412	1.403	1.401	1.405	0.006	0.4%
6	1.322	1.321	1.305	1.316	0.010	0.7%
7	1.337	1.340	1.341	1.339	0.002	0.2%
8	1.125	1.121	1.132	1.126	0.005	0.5%
9	0.839	0.836	0.839	0.838	0.002	0.2%
10	0.802	0.801	0.800	0.801	0.001	0.1%
11	0.998	Sin registro	0.997	0.998	0.001	0.1%
12	0.885	0.879	0.883	0.882	0.003	0.3%
13	0.742	0.743	0.744	0.743	0.001	0.2%
14	0.822	0.821	0.826	0.823	0.003	0.4%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4 Frecuencias fundamentales, en hertz, identificadas en cables de la semi- arpa 4

Cable	9/mar/22	21/jun/22	20/sep/22	μ	σ	C.V.
1	2.338	2.347	2.373	2.353	0.018	0.8%
2	2.418	2.345	2.417	2.394	0.042	1.7%
3	2.039	1.993	2.010	2.014	0.024	1.2%
4	1.934	Sin registro	1.917	1.925	0.012	0.6%
5	1.566	1.548	1.564	1.559	0.010	0.6%
6	1.483	1.488	1.498	1.490	0.007	0.5%
7	1.055	1.056	1.069	1.060	0.008	0.8%
8	1.107	1.103	1.112	1.108	0.005	0.4%
9	0.827	0.828	0.830	0.828	0.002	0.2%
10	0.837	0.837	0.833	0.836	0.002	0.2%
11	0.963	Sin registro	0.969	0.966	0.005	0.5%
12	0.867	0.870	0.866	0.868	0.002	0.3%
13	0.823	0.825	0.823	0.823	0.001	0.2%
14	0.776	0.776	0.776	0.776	0.000	0.0%

Fuente: Elaboración propia.

6. Se estimó el factor de calibración de cada cable.

Con las tensiones obtenidas en los cables a través del último pesaje directo de fecha septiembre de 2018, efectuado en el puente con equipo hidráulico, y las frecuencias fundamentales de los tirantes, se calculó el factor de calibración de cada cable a través de la ecuación 3.6.

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (3.6)$$

En donde, f es el valor promedio de la frecuencia natural en hertz, l es la longitud del cable en metros, T es la tensión del cable en newtons y m es la masa por unidad de longitud del cable en kg/m.

El valor de la tensión se obtuvo del último pesaje directo realizado en septiembre de 2018 en el puente. La tabla 3.5 muestra el valor de tensión de cada tirante.

Tabla 3.5 Tensión, en toneladas, del último pesaje directo en el puente El Carrizo

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)	2- (Cuerpo A Mazatlán)	3 - (Cuerpo B Mazatlán)	4 - (Cuerpo B Durango)
1	116.68	108.83	69.96	108.83
2	149.64	163.25	155.47	155.47
3	151.58	155.47	155.47	167.13
4	202.11	155.47	198.23	198.23
5	206.00	143.81	151.58	202.11
6	225.43	161.30	174.91	233.21
7	186.57	275.96	252.64	171.02
8	194.34	225.43	240.98	237.09
9	240.98	198.23	194.34	194.34
10	217.20	217.20	190.45	229.32
11	362.00	369.63	318.72	373.13
12	360.10	335.33	361.47	365.36
13	396.88	332.68	345.29	419.71
14	484.43	531.13	544.72	511.98

Fuente: Euro Estudios S.A. de C.V.

La figura 3.13 muestra el factor de calibración estimado en cada tirante.

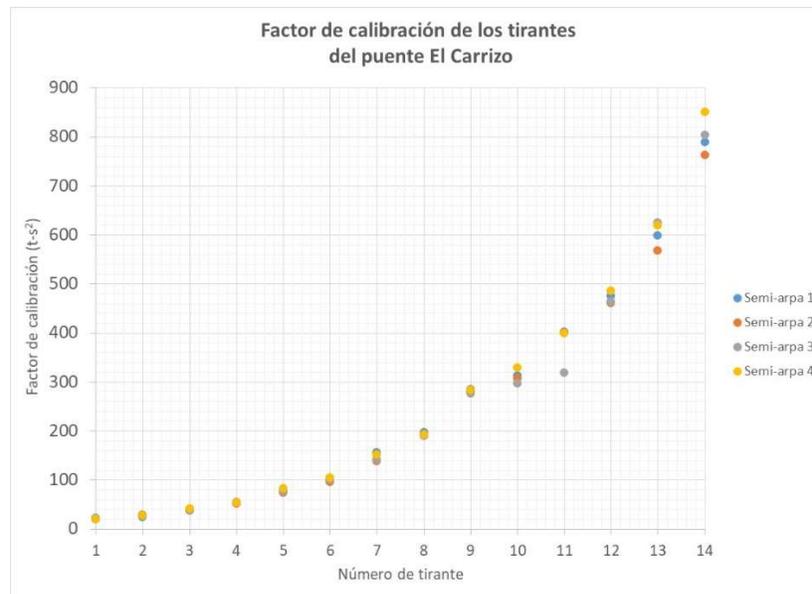


Figura 3.13 Factor de calibración por tirante

Es importante aclarar que el factor de calibración del tirante 11 obtenido en la semi-arpa 3 se encuentra por debajo del conjunto de tirantes 11 (semi-arpas 1, 2 y 4). Por lo que, se realizó un análisis para identificar la posible causa de tal diferencia y en consecuencia asignar un factor de calibración.

A partir de la ecuación 3.6, se observa que el factor de calibración depende de tres variables: la longitud, la frecuencia fundamental y la tensión (pesaje directo):

- a) Al considerar que los tirantes 11 tiene una longitud similar de acuerdo a los planos de diseño, resulta poco probable que sea la variable motivo de la diferencia.
- b) Tomando en cuenta que las frecuencias fundamentales, obtenidas de manera experimental, en los tirantes 11 de las cuatro semi-arpas son similares (ver tabla correspondiente en Anexo 3), al presentar diferencias porcentuales de: -1.9%, -0.8%, 3.0% y -0.2% en las semi-arpas 1 al 4, con respecto el promedio de las frecuencias. Se desestima que la frecuencia fundamental sea la causa de la diferencia.
- c) Se atribuye la diferencia al registro de tensión. Principalmente porque el registro de tensión del pesaje directo en septiembre 2018, es 105.3 y 95.2 toneladas menos que los pesajes directos efectuados en septiembre de 2013 y octubre de 2016. Ya que al perder tensión el tirante 11, se esperaría que la carga se distribuya en los tirantes adyacentes, ocasionado un incremento en la tensión de los tirantes 10 y 12. Efecto no observado, por el contrario, la tensión registrada indica pérdida de tensión en los tirantes 10 y 12, como se aprecia en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Registros de tensión, en t (toneladas), de los tirantes 10, 11 y 12 de la semi-arpa 3 (lado agua – cuerpo aguas abajo)

Tirante	SEP/2013	OCT/2016	SEP/2018	Diferencia (2018-2013)		Diferencia (2018-2016)	
				t	%	t	%
10	206	202.11	190.45	-15.6	-7.5%	-11.7	-5.8%
11	424	413.94	318.72	-105.3	-24.8%	-95.2	-23.0%
12	396	380.91	361.47	-34.5	-8.7%	-19.4	-5.1%

Fuente: Euro Estudios S.A. de C.V.

Debido a lo anterior, para el tirante 11 de la semi-arpa 3 se utilizó el valor promedio del factor de calibración de los tirantes 11 de las semi-arpas 1, 2 y 4. Finalmente, la tabla 3.7 presenta el factor de calibración, en $t \cdot s^2$ (toneladas - segundos cuadrados), de los 56 tirantes del puente El Carrizo.

Tabla 3.7 Factor de calibración, en t-s², de los tirantes del puente El Carrizo

Cable	1 - (Cuerpo A Durango)	2- (Cuerpo A Mazatlán)	3 - (Cuerpo B Mazatlán)	4 - (Cuerpo B Durango)
1	21.59	19.62	22.71	19.66
2	24.37	28.04	28.48	27.14
3	39.23	37.78	38.09	41.20
4	52.71	52.75	55.65	53.48
5	76.99	73.63	76.75	83.15
6	102.51	96.82	100.98	105.08
7	155.52	138.64	140.87	152.27
8	196.69	191.99	190.14	193.28
9	284.48	280.23	276.81	283.28
10	313.47	307.00	296.77	328.42
11	401.74	400.77	400.78	399.82
12	475.69	461.26	464.41	485.43
13	599.23	568.55	625.44	619.01
14	789.44	762.83	803.91	850.72

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Análisis modal

Las señales de aceleración adquiridas en el tramo atirantado fueron analizadas mediante la técnica EFDD (detallada en la sección 3.1.4). En la figura 3.14 se muestra el espectro de valores singulares obtenido para la dirección vertical, se observan los modos de vibración predominantes en un rango de 0.26 a 5 Hz.

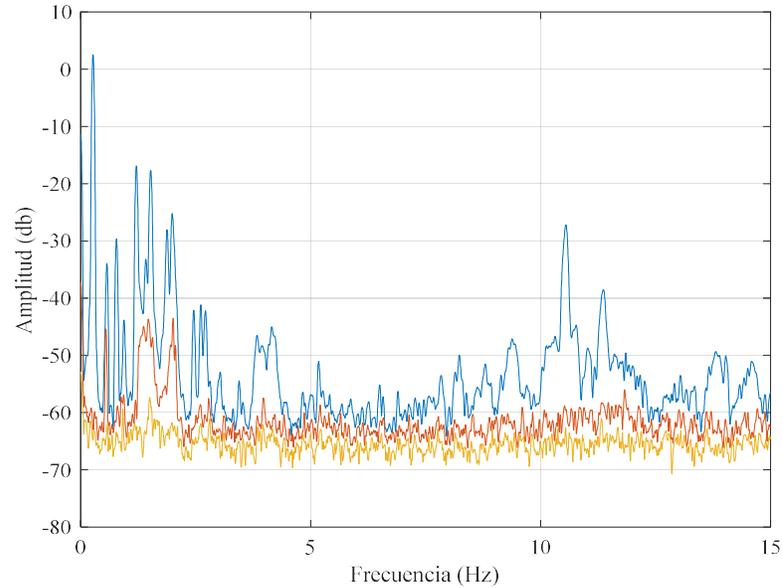


Figura 3.14 Espectro de valores singulares del atirantado

De los picos del espectro, se obtuvieron las funciones SDOF para determinar los valores de las frecuencias naturales y factores de amortiguamiento de los modos del atirantado. En la figura 3.15, se muestra la función SDOF en el primer modo a flexión de la sección atirantada.

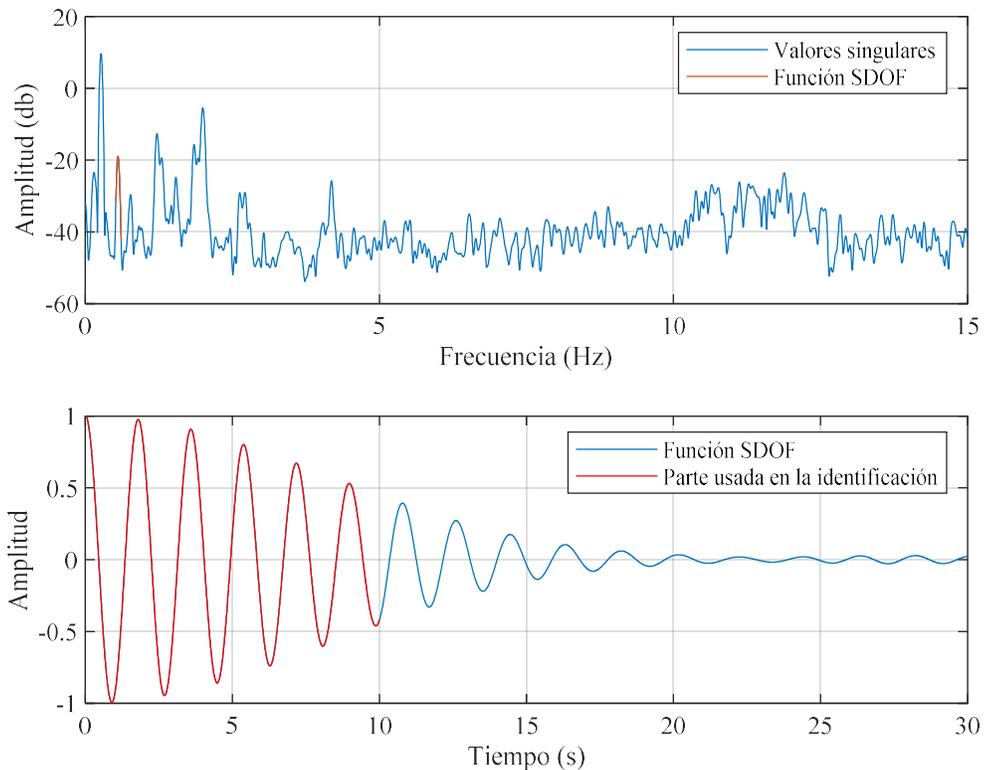


Figura 3.15 Función SDOF del primer modo del tramo atirantado

4. Modelo de elementos finitos del puente el Carrizo

Originalmente introducido por Turner en 1956, el método de elementos finitos (MEF) representa una técnica computacional para aproximar soluciones de una gran variedad de problemas del mundo real con dominios complejos sujetos a condiciones de frontera generales (Madenci, & Guven, 2006). En el MEF, el continuo o cuerpo en estudio tal como un sólido, líquido o gas, está representado como un conjunto de subdivisiones pequeñas llamadas elementos finitos. Estos elementos se consideran interconectados en puntos llamados nodos, los cuales usualmente yacen en las fronteras de los elementos donde los elementos adyacentes se consideran conectados. Al usar propiedades esfuerzo-deformación del material del que se compone la estructura, se puede determinar el comportamiento (respuesta estructural) de un nodo, en función de los términos de las propiedades de los elementos de la estructura.

El conjunto total de ecuaciones que describen el comportamiento de cada nodo deriva en una serie de ecuaciones que se expresan usualmente en forma matricial en la ecuación 4.1.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (4.1)$$

Donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente. Estas matrices contienen la información de las propiedades del material de la estructura (parámetros estructurales). El $\{u\}$ es el vector de desplazamiento, cuyas derivadas $\{\dot{u}\}$ y $\{\ddot{u}\}$ son los vectores de velocidad y aceleración, respectivamente, y $\{P\}$ es el vector de fuerzas. Por otra parte, la ecuación 4.2 describe el comportamiento dinámico de un sistema no amortiguado:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (4.2)$$

Al considerar la ecuación 4.2 como homogénea (vibración libre) y adoptar una solución para $u(t)=\{\hat{u}\}e^{i\omega t}$, dado que el movimiento es armónico, se obtiene un problema de valores y vectores característicos, reducido a la ecuación 4.3.

$$[[K] - \omega^2[M]]\{\hat{u}\} = 0 \quad (4.3)$$

Donde los valores propios ω son las frecuencias naturales del sistema y $\{\hat{u}\}$ son los vectores propios asociados a cada frecuencia natural, conocidos como formas modales (Anaya et al., 2018).

4.1 Actualización del MEF

Para actualizar el modelo de elementos finitos del puente El Carrizo (figura 4.1) se utilizó la información modal obtenida del análisis de las señales de monitoreo periódico y, además, se utilizaron los valores de las tensiones de los tirantes, obtenidos del último pesaje directo, realizados en el año de 2018, indicados con anterioridad en la tabla 3.19.

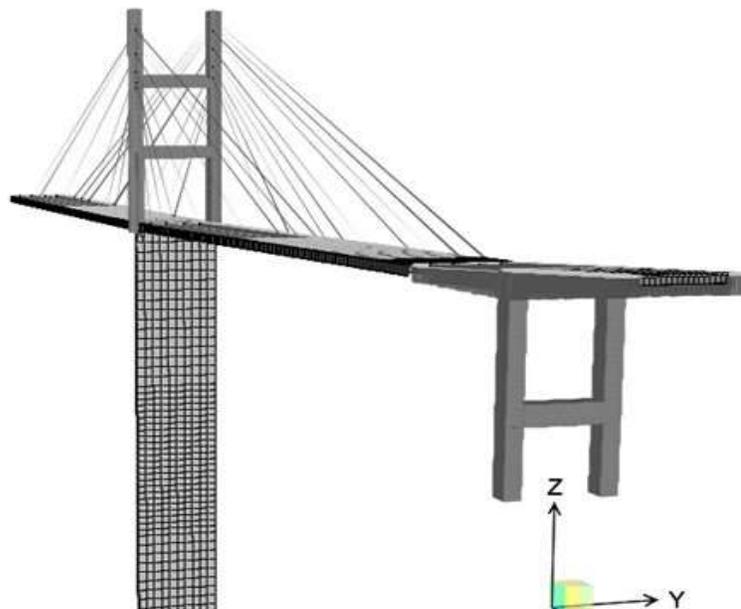


Figura 4.1 Modelo de elementos finitos del puente El Carrizo

Para actualizar la calibración de las tensiones del modelo, inicialmente se calcularon las deformaciones unitarias en los tirantes a partir de las tensiones de los pesajes, considerando el área y módulo de elasticidad de cada tirante. Estas deformaciones unitarias, se asignaron a los elementos tipo barra que simulan los tirantes del puente, a su vez, se calcularon los efectos producidos por las cargas gravitacionales que actúan sobre el puente, las cuales corresponden al peso propio de los elementos estructurales y al peso de la carpeta asfáltica. Lo anterior conllevó un procedimiento iterativo, en el cual, se ajustaban los valores de estas deformaciones unitarias de tal manera que la tensión resultante en los elementos sea inferior al 5% de diferencia con respecto a los pesajes directos.

El procedimiento iterativo se basó en el reportado en la literatura (Chen et al., 2000). En las figuras 4.2 y 4.3 se muestran las comparativas de las tensiones del modelo de elemento finito (Modelo EF) y las tensiones de los tirantes (Pesaje 2018) en los cuerpos A y B del puente, respectivamente.

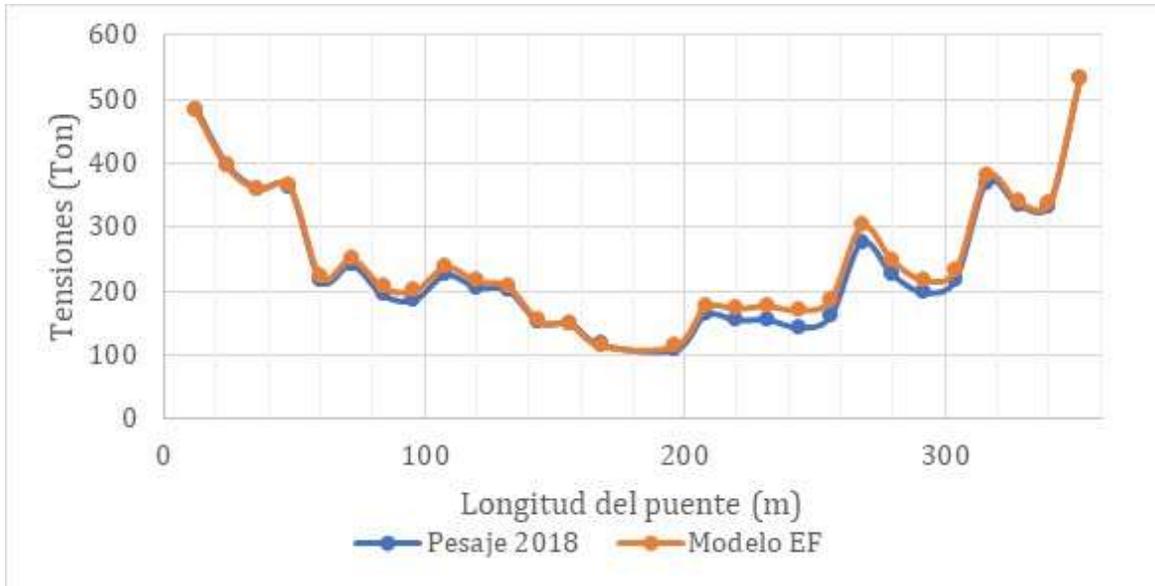


Figura 4.2 Comparativa de tensiones en tirantes del Cuerpo A

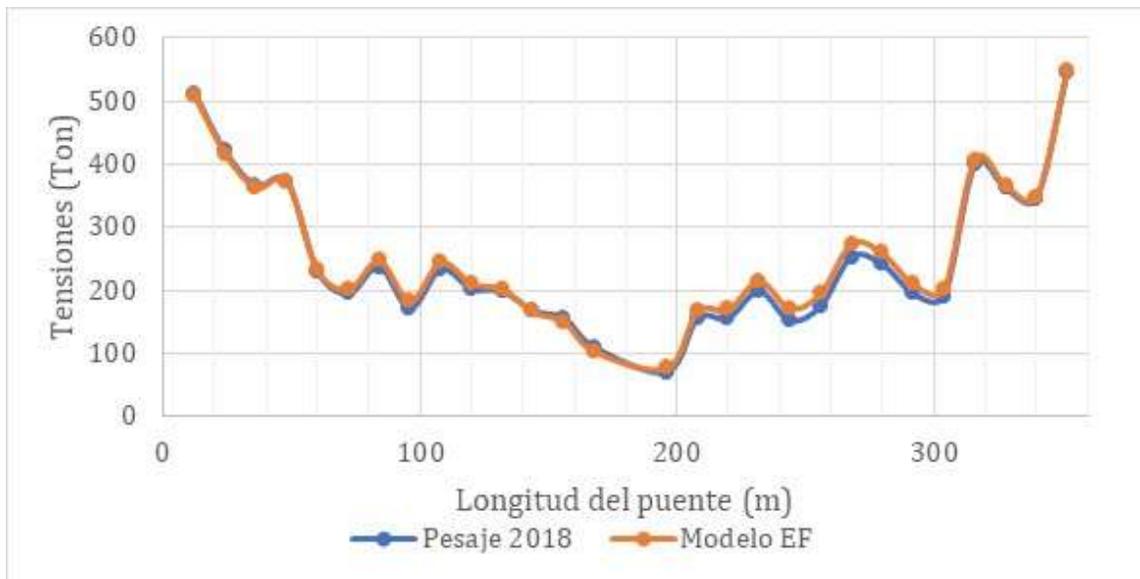


Figura 4.3 Comparativa de tensiones en tirantes del Cuerpo B

Una vez calibrados el MEF con las tensiones de 2018, se procedió a estimar el perfil de deflexión por cargas permanentes que tiene actualmente el puente. En la figura 4.4, se muestran los desplazamientos en dirección vertical del puente en los nodos donde se anclan los tirantes, obtenidos a

través del modelo del puente. Como se puede observar, al centro del claro comprendido entre el estribo 1, (lado Durango) y la Pila 2, se presenta un desplazamiento de 16.85 cm, mientras que para el claro comprendido entre la Pila 2 y el apoyo del doble voladizo, se presenta la deflexión máxima, la cual es de 33.73 cm.



Figura 4.4 Perfil de deflexión por carga muerta del puente El Carrizo

5. Resultados

5.1 Sección doble voladizo

5.1.1 Valor estadístico de deformación unitaria

La tabla 5.1 muestra el resultado obtenido del cálculo de los límites inferiores y superiores por efectos a tensión y compresión en las dovelas instrumentadas por la parte superior, calculado a través de los registros generados al finalizar la rehabilitación en 2018, agosto y septiembre, las mediciones efectuadas en 2021, mayo y agosto; así como las tres sesiones de medición efectuadas en 2022: marzo, junio y septiembre.

Tabla 5.1 Valor estadístico de la media y límites de operación normal para sensores superiores

Sensor	Media compresión	Media tensión	σ compresión	σ tensión	Límite inferior	Límite superior
ESD4AD	-1.82	4.48	0.18	0.64	-2.27	6.08
ESD1AD	-2.35	6.01	0.11	0.76	-2.62	7.91
ESD1AM	-1.30	2.46	0.09	0.16	-1.52	2.86
ESD4AM	-1.02	1.30	0.05	0.06	-1.15	1.45
ESD4BD	-2.22	2.46	0.84	0.49	-4.32	3.68
ESD1BD	-1.70	4.55	0.13	0.37	-2.03	5.47
ESD1BM	-1.32	1.59	0.34	0.15	-2.17	1.97
ESD4BM	-1.45	2.61	0.04	0.2	-1.55	3.11

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en las figuras 5.1 a 5.8 se presentan los valores de la media estadística de deformación unitaria a tensión y compresión, provocada por las cargas vivas (tránsito vehicular), así como los límites superior e inferior bajo condición de operación normal en los sensores ubicados en la parte superior de las dovelas instrumentadas.

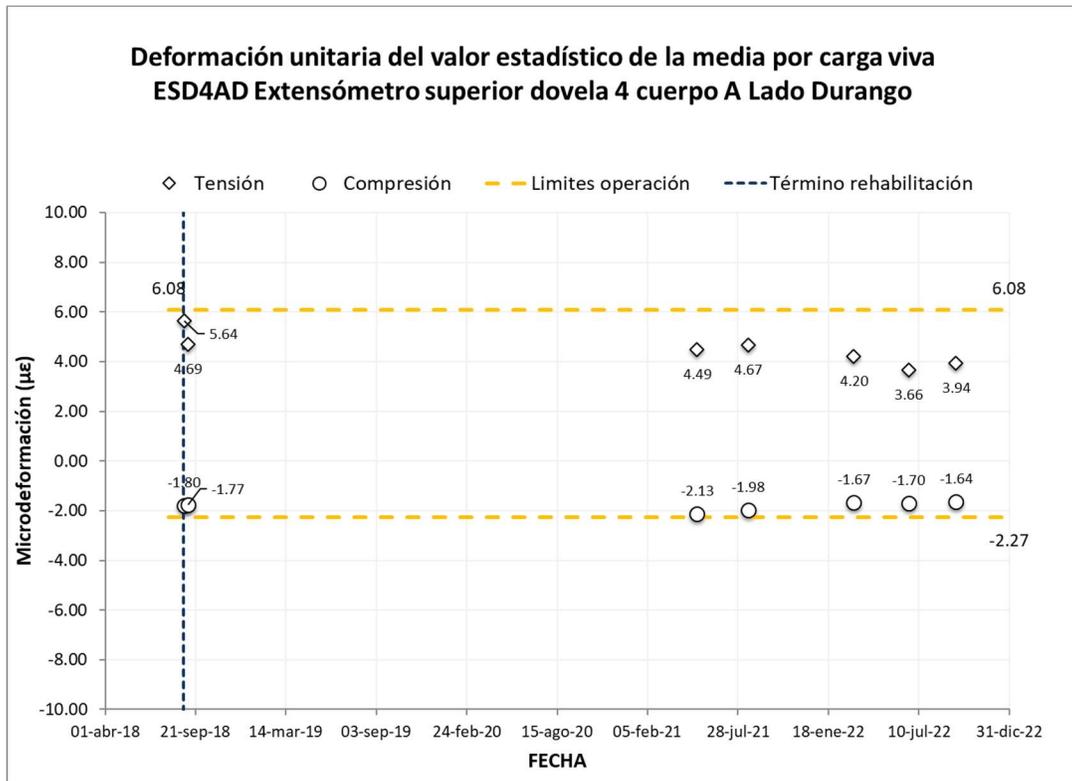


Figura 5.1 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4AD

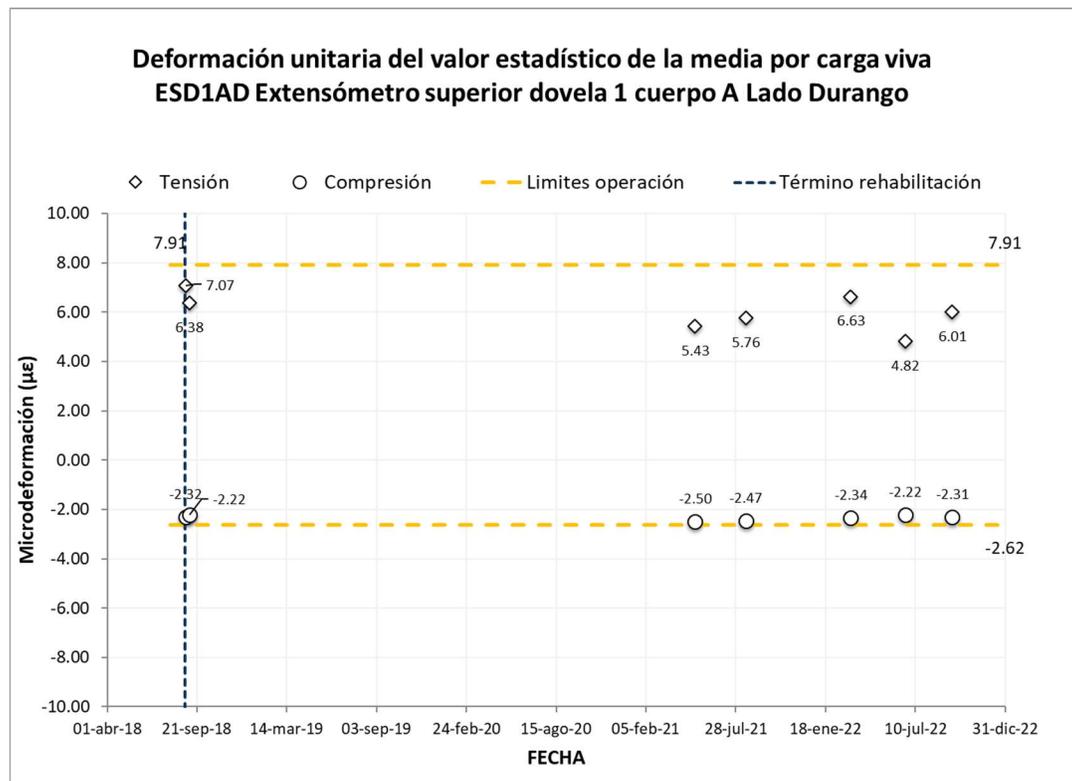


Figura 5.2 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4BD

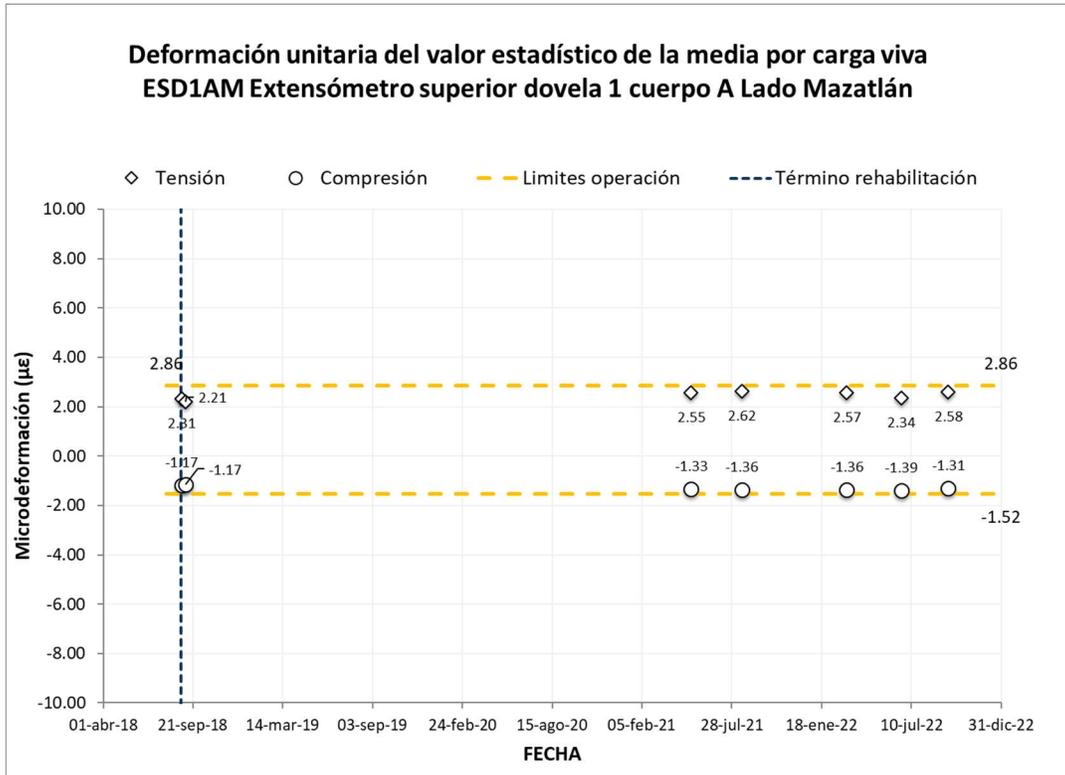


Figura 5.3 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD1AM

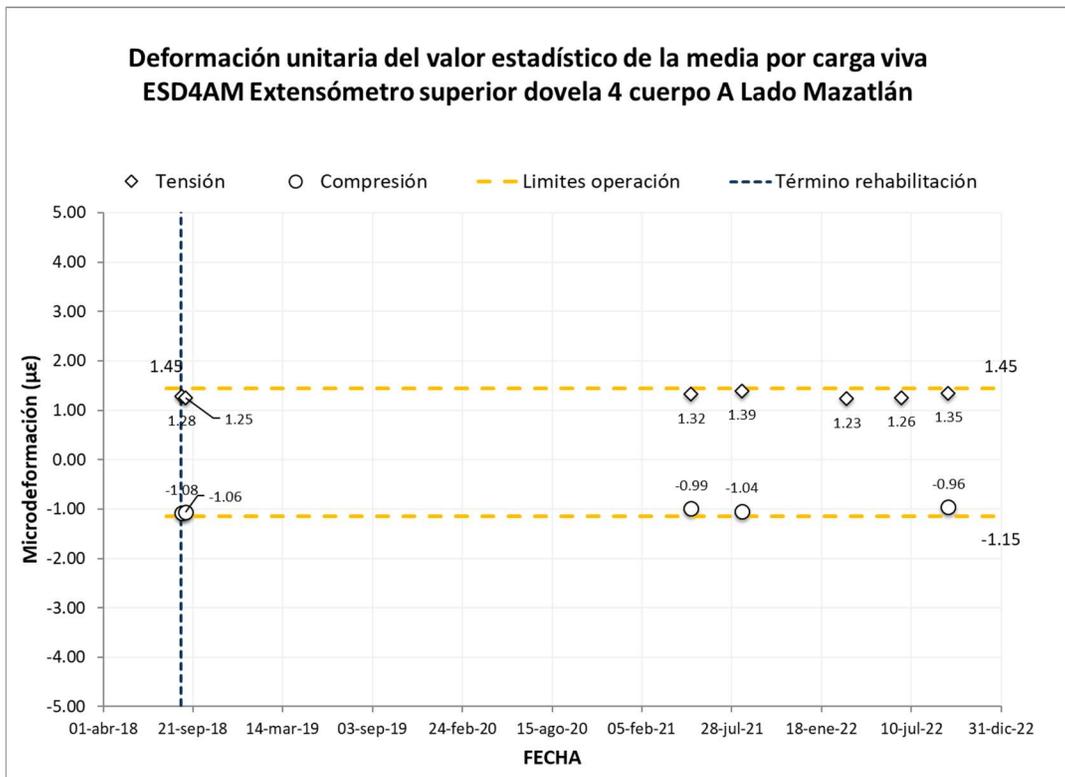


Figura 5.4 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4AM

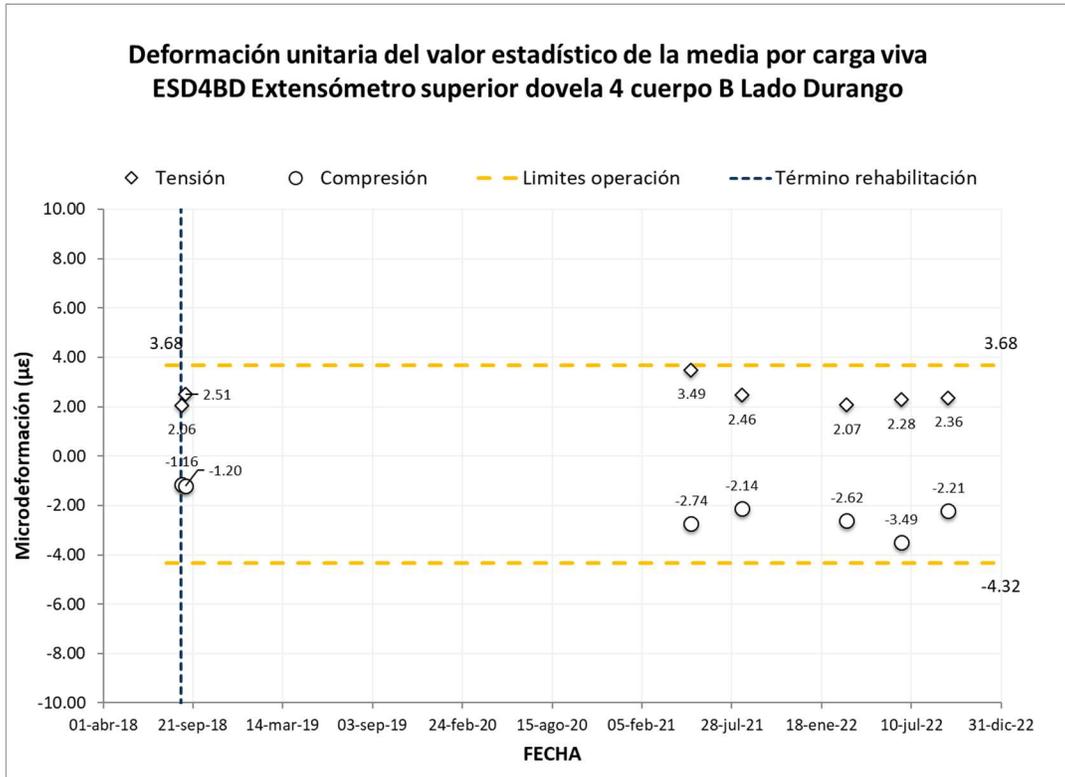


Figura 5.5 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4BD

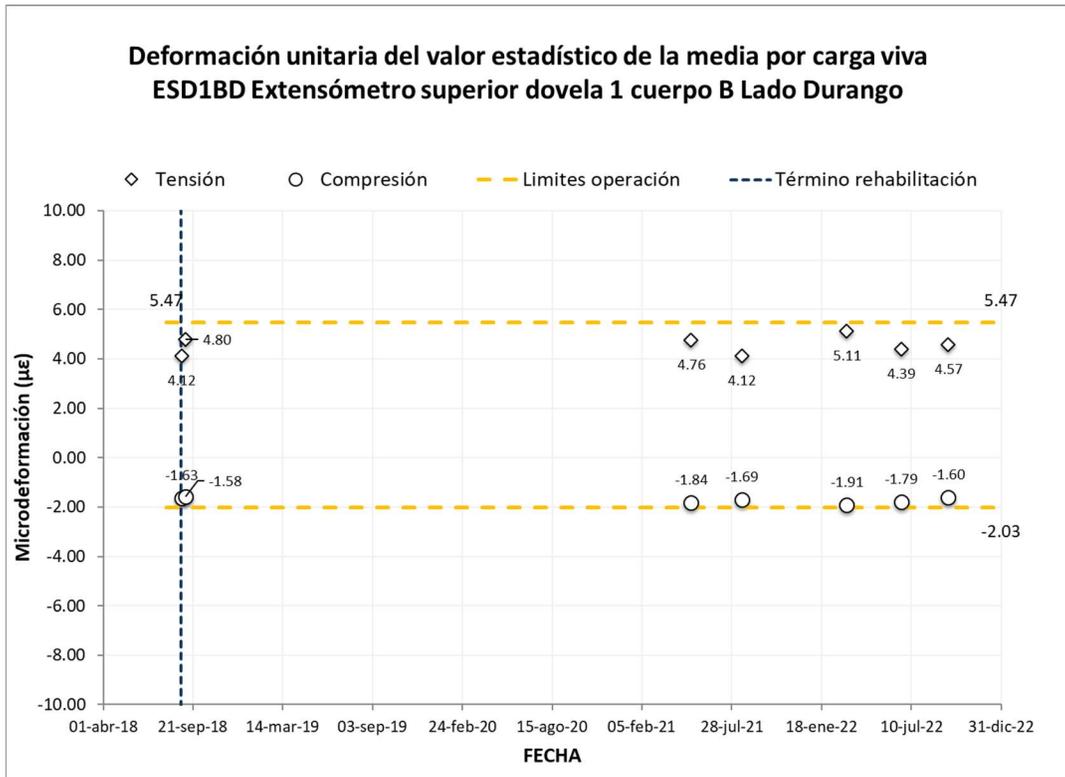


Figura 5.6 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD1BD

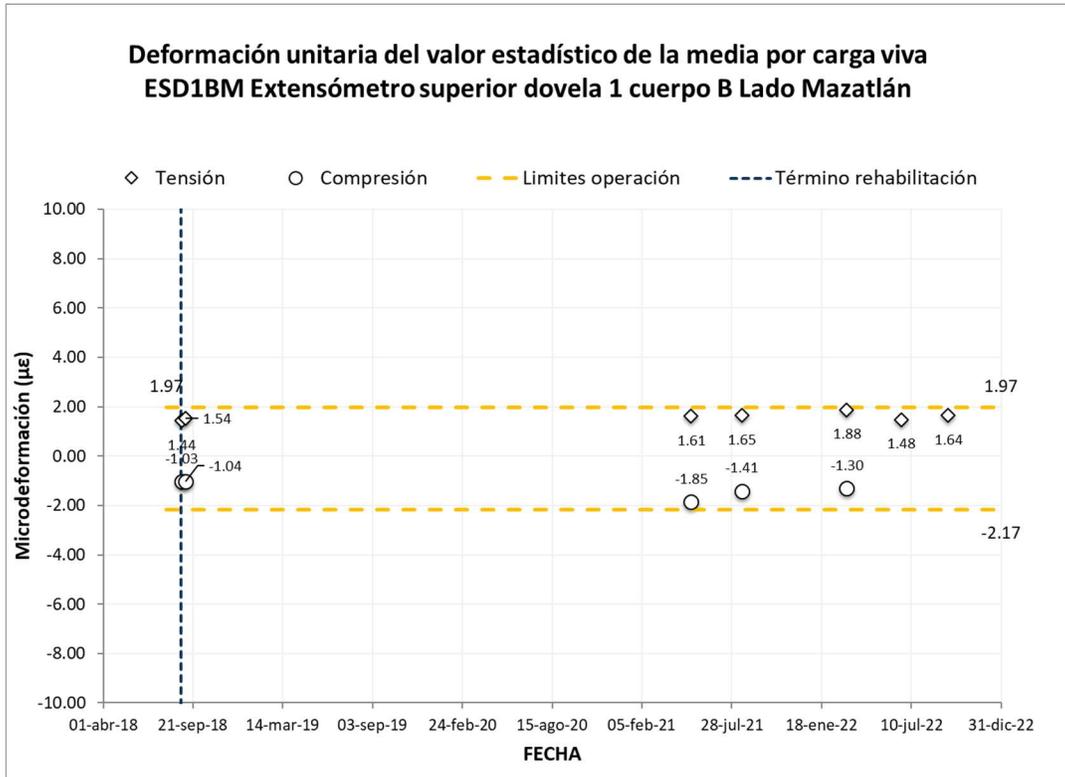


Figura 5.7 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4BDq

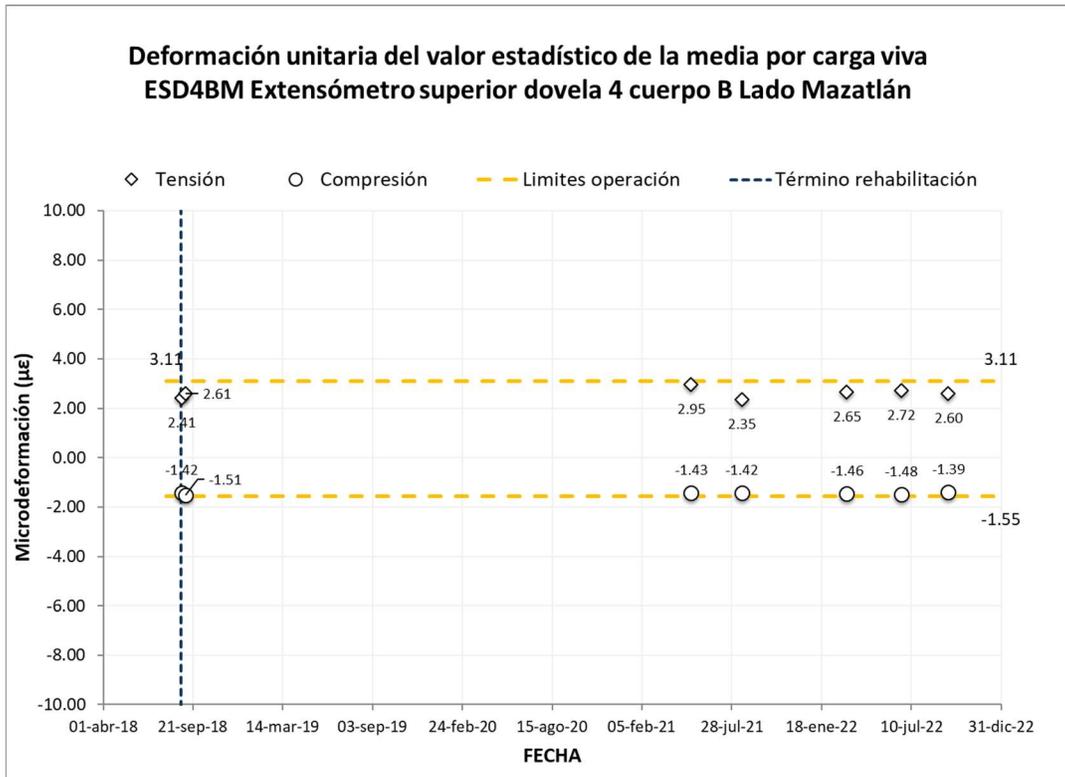


Figura 5.8 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4BM

La tabla 5.2 presenta los resultados obtenidos del cálculo de los límites inferiores y superiores por efectos a tensión y compresión en las dovelas instrumentadas por la parte inferior, calculado a través de los registros obtenidos al término de la rehabilitación en 2018, agosto y septiembre, así como del par de sesiones de medición efectuadas en 2021, mayo y agosto; así como las tres sesiones de medición efectuadas en 2022: marzo, junio y septiembre.

Tabla 5.2 Valor estadístico de la media y límites de operación normal para sensores inferiores

Sensor	Media compresión	Media tensión	σ compresión	σ tensión	Límite inferior	Límite superior
EID4AD	-3.68	1.67	0.53	0.12	-5.01	1.97
EID1AD	-2.61	1.32	0.54	0.11	-3.96	1.60
EID1AM	-1.56	0.99	0.20	0.04	-2.06	1.09
EID4AM	-1.08	0.95	0.04	0.06	-1.18	1.10
EID4BD	-2.11	1.35	0.25	0.51	-2.73	2.63
EID1BD	-1.95	1.13	0.13	0.06	-2.28	1.28
EID1BM	-1.70	1.16	0.17	0.14	-2.12	1.51
EID4BM	-1.21	1.02	0.18	0.15	-1.66	1.40

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en las figuras 5.9 a 5.16 se presentan los valores de la media estadística de deformación unitaria a tensión y compresión, provocada por las cargas vivas (tránsito vehicular), así como los límites superior e inferior bajo condición de operación normal en los sensores ubicados en la parte inferior de las dovelas instrumentadas.

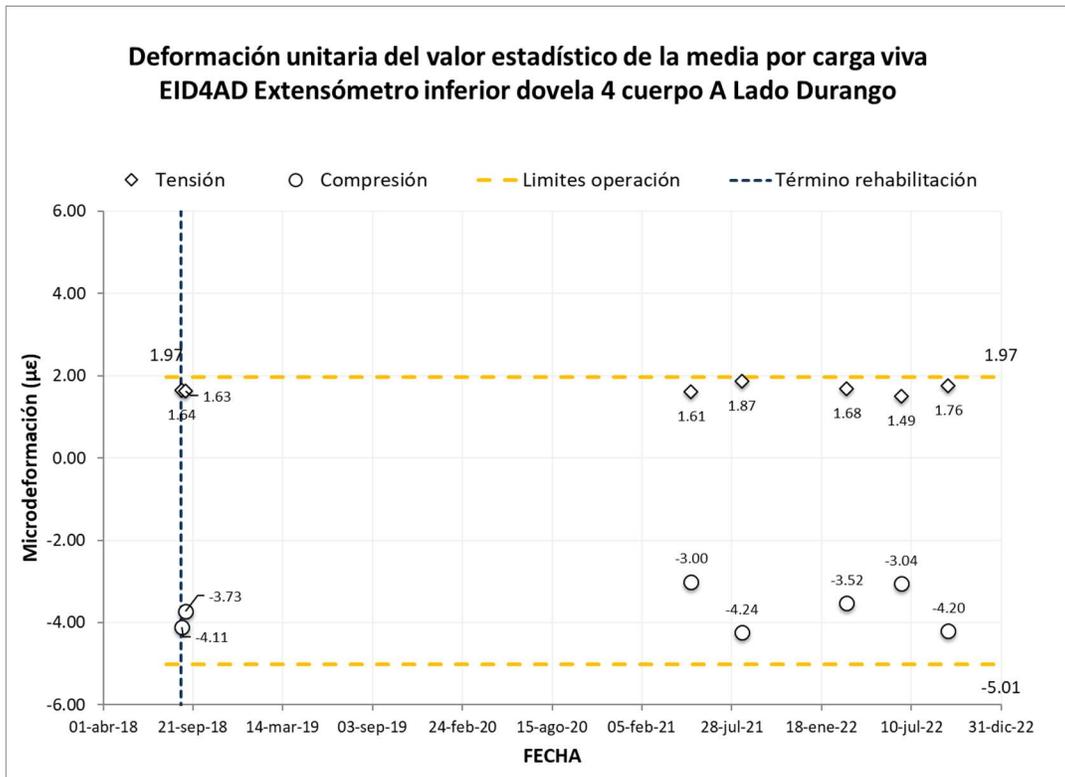


Figura 5.9 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID4AD

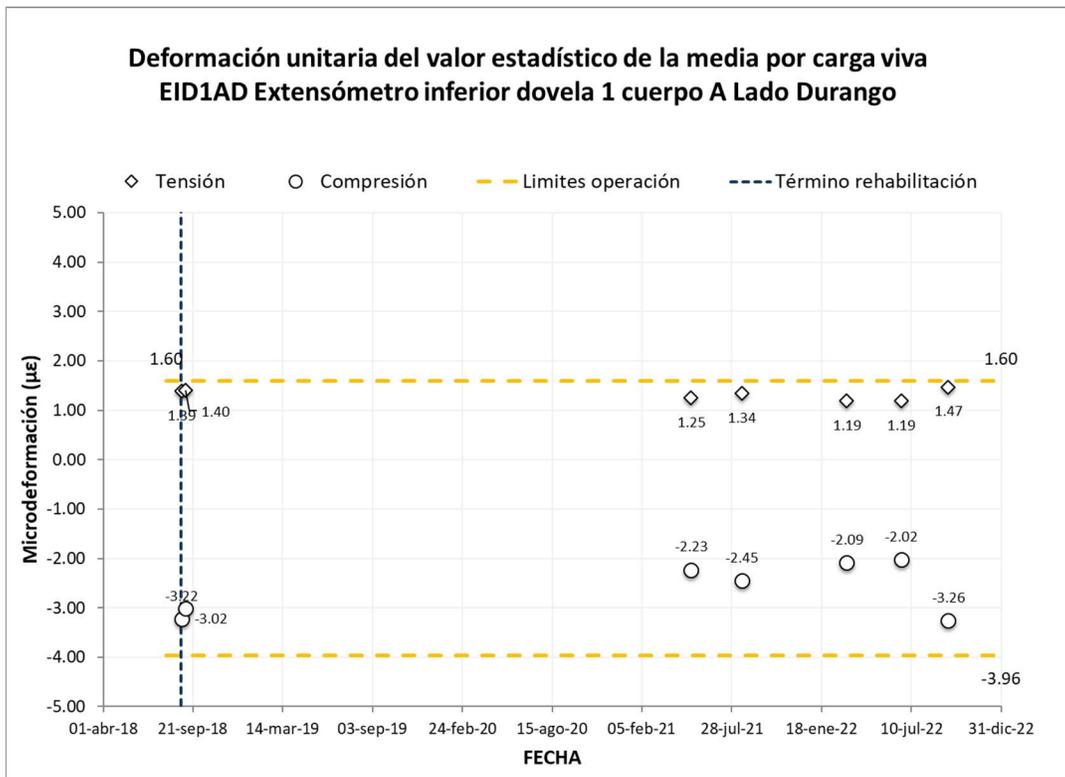


Figura 5.10 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID1AD

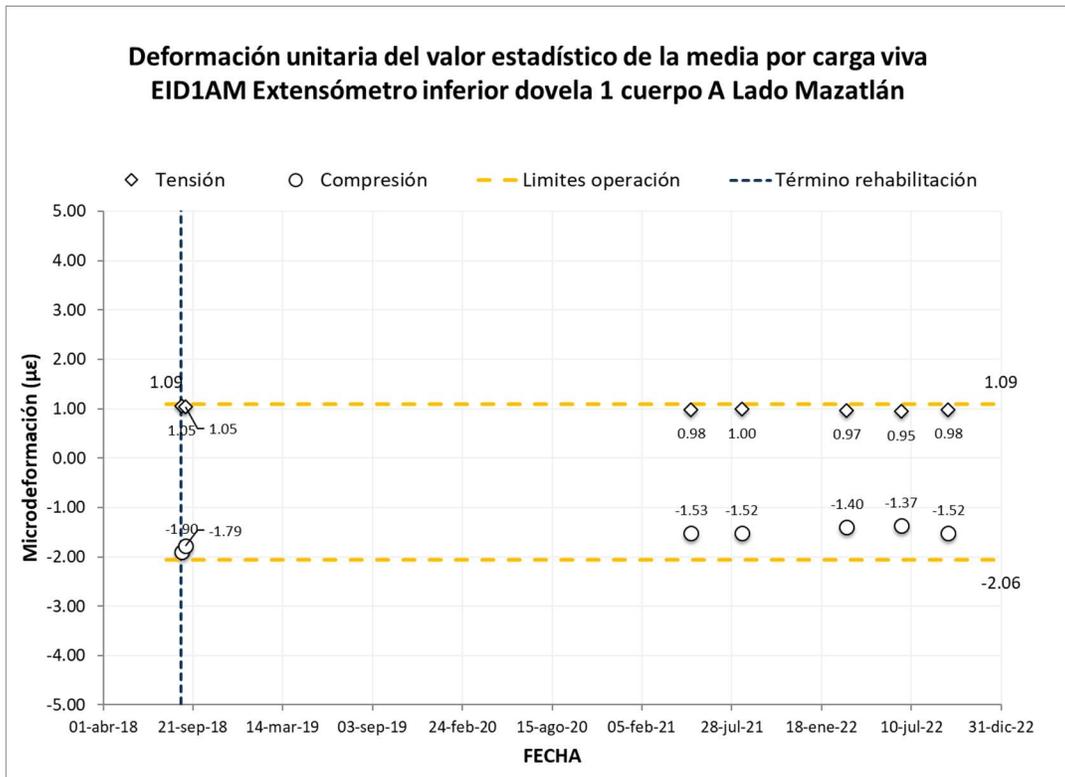


Figura 5.11 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID1AM

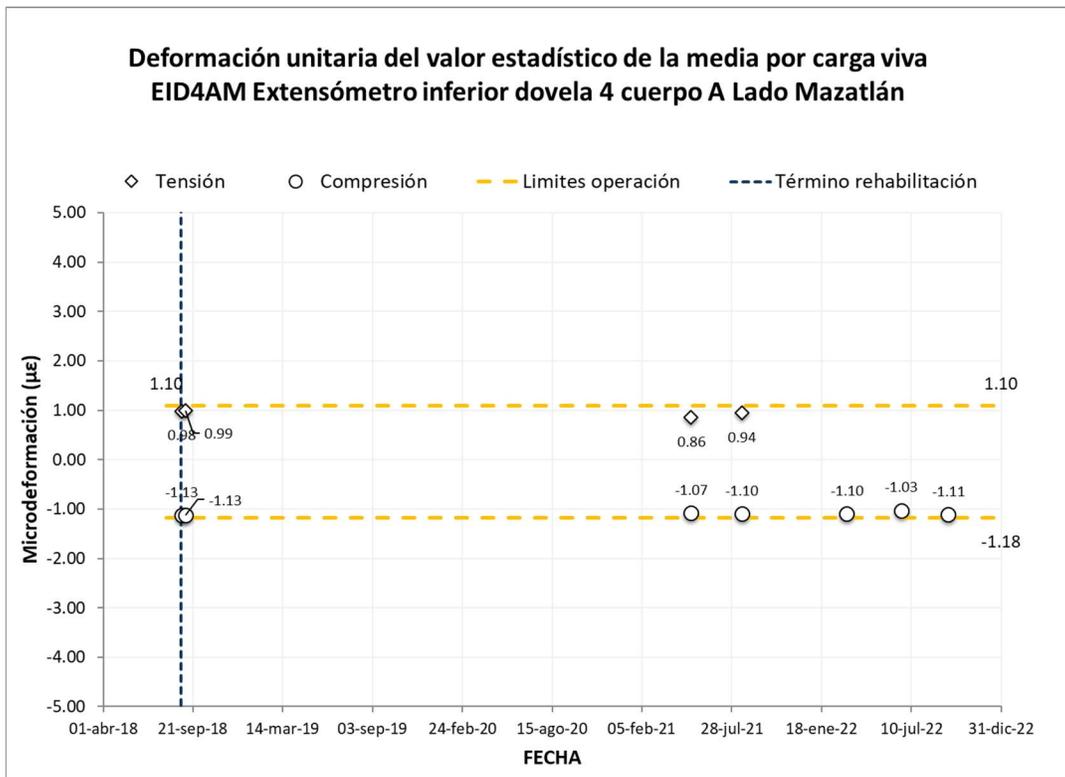


Figura 5.12 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID4AM

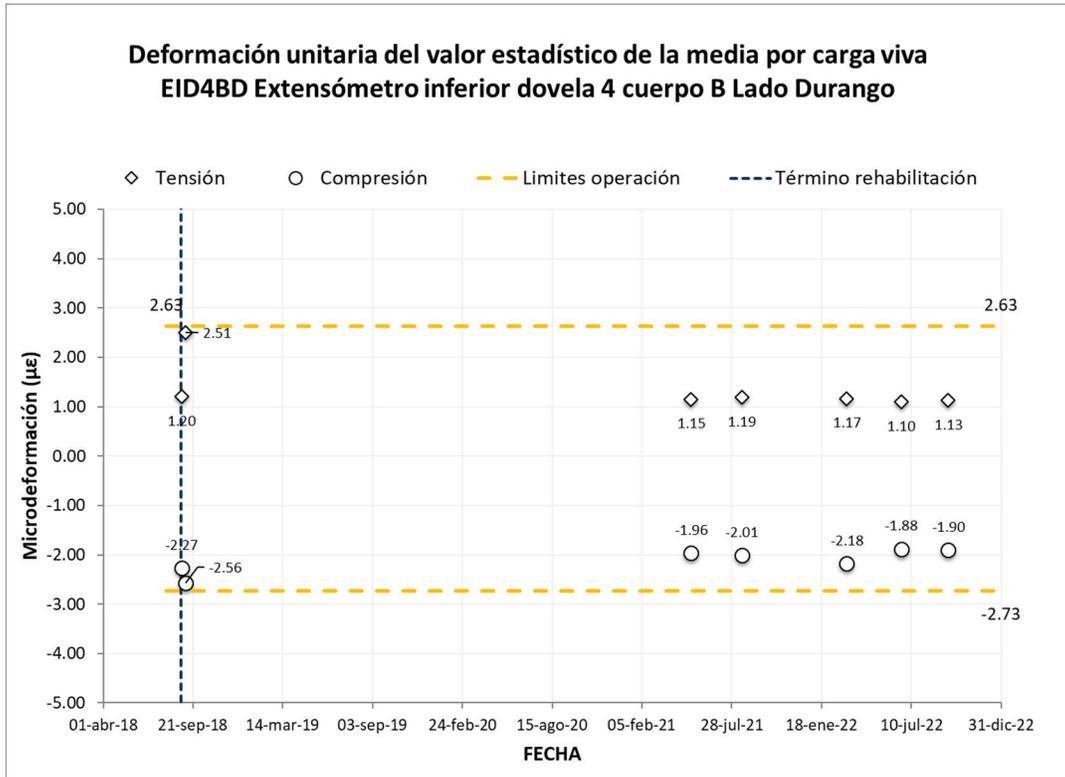


Figura 5.13 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID4BD

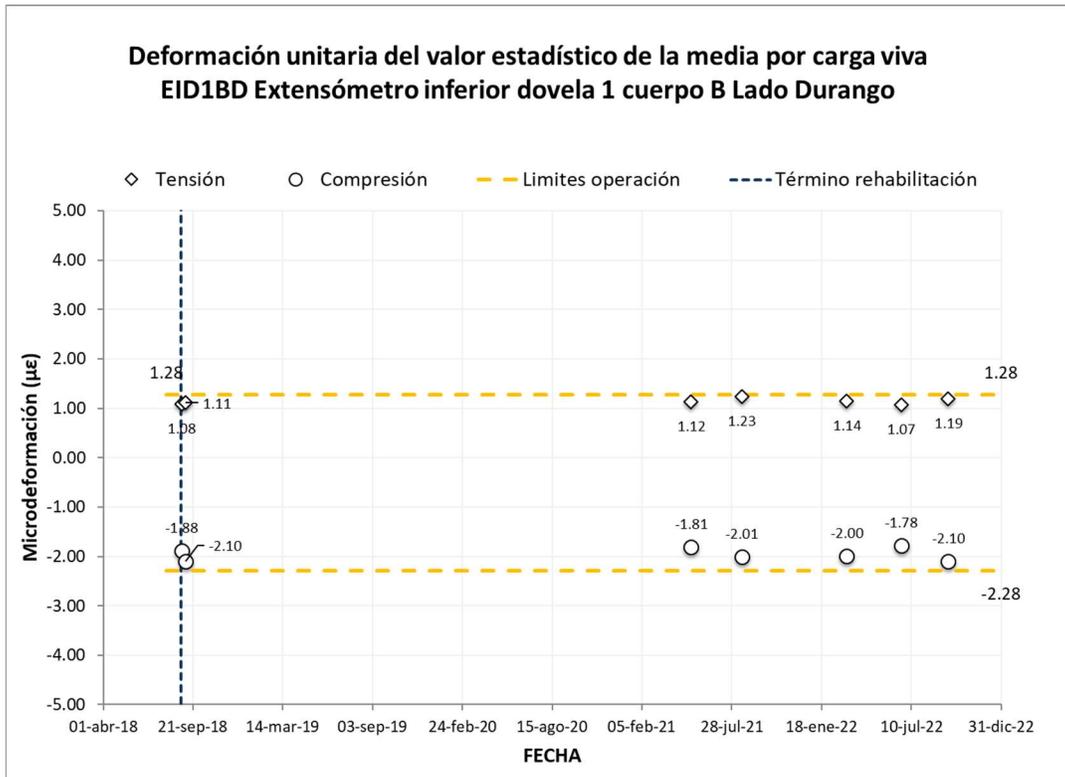


Figura 5.14 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID1BD

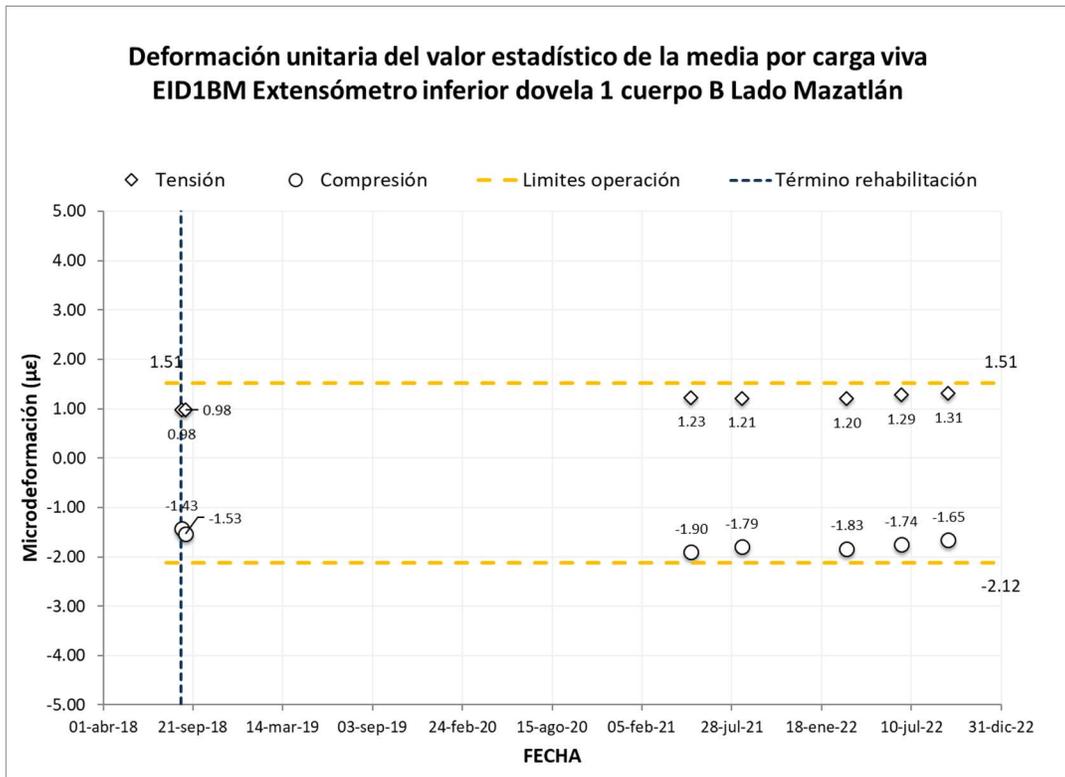


Figura 5.15 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID1BM

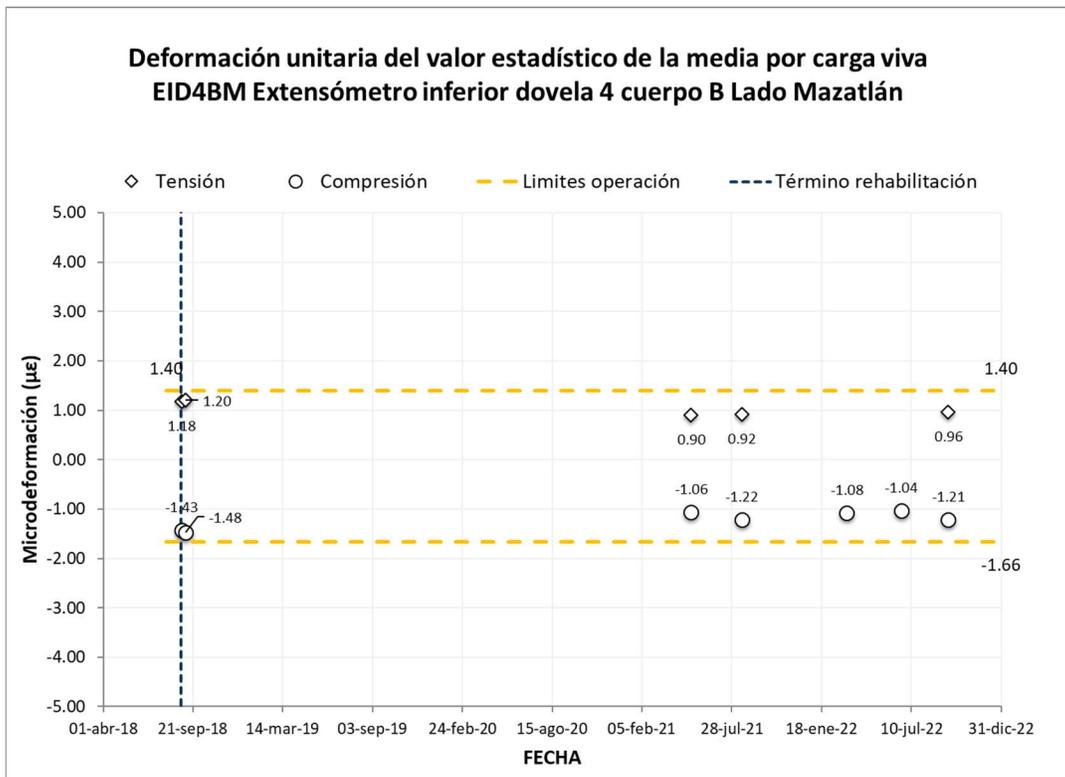


Figura 5.16 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID4BM

5.1.2 Valor de referencia: deformación e inclinación

Las figuras 5.17 a 5.24 muestran, por cada día en las tres sesiones de mediciones, el valor de referencia en microdeformaciones unitarias de los extensómetros instalados en la parte inferior de las dovelas No. 4 y No. 7 de la sección doble voladizo del puente.

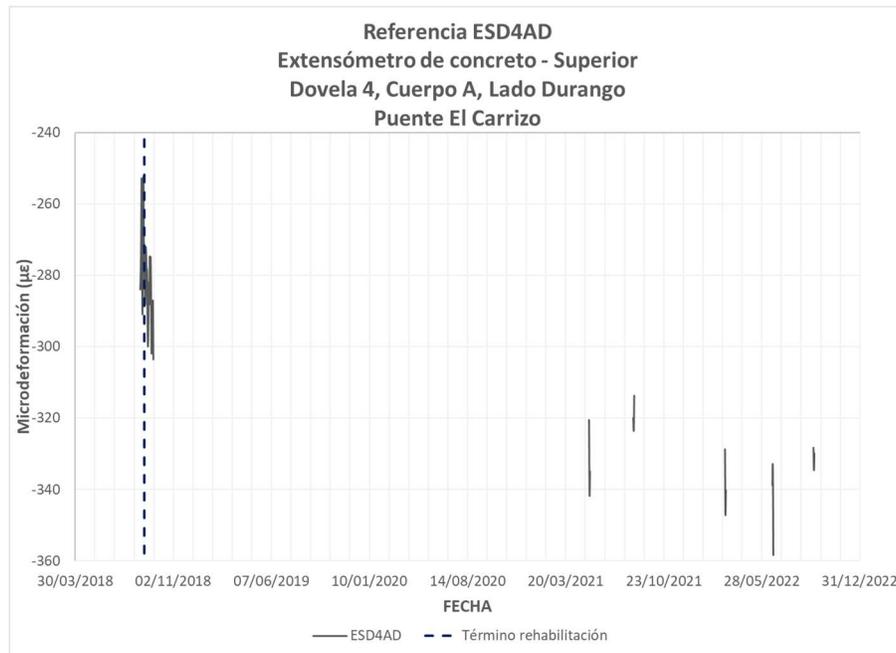


Figura 5.17 Valor de referencia de deformación del sensor ESD4AD

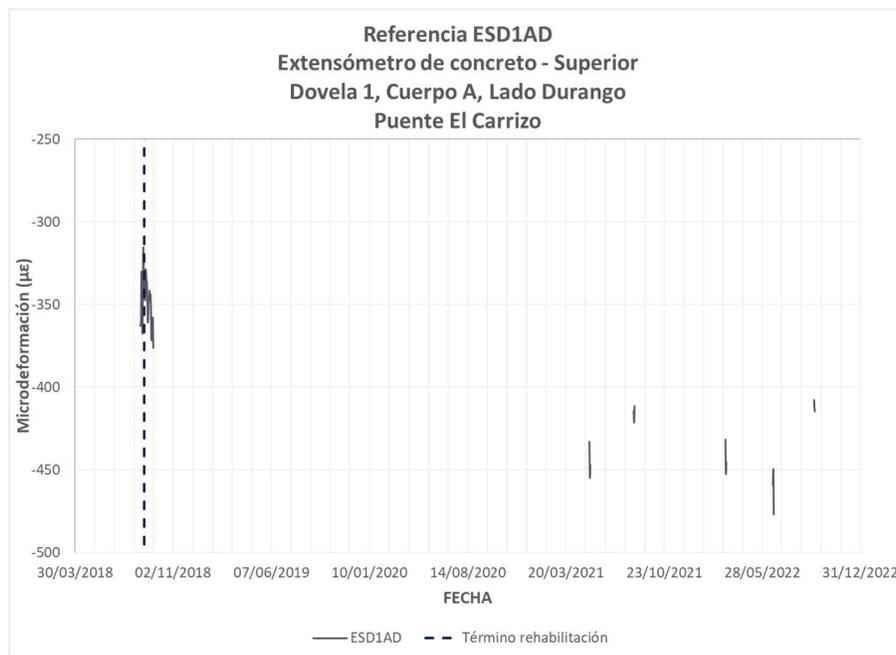


Figura 5.18 Valor de referencia de deformación del sensor ESD1AD

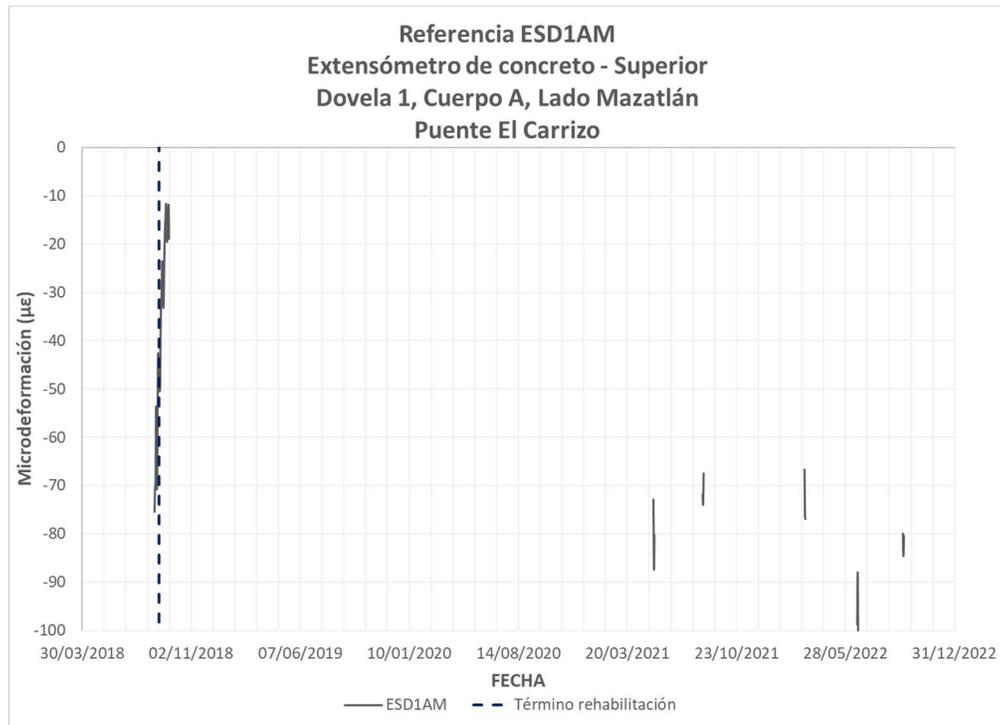


Figura 5.19 Valor de referencia de deformación del sensor ESD1AM

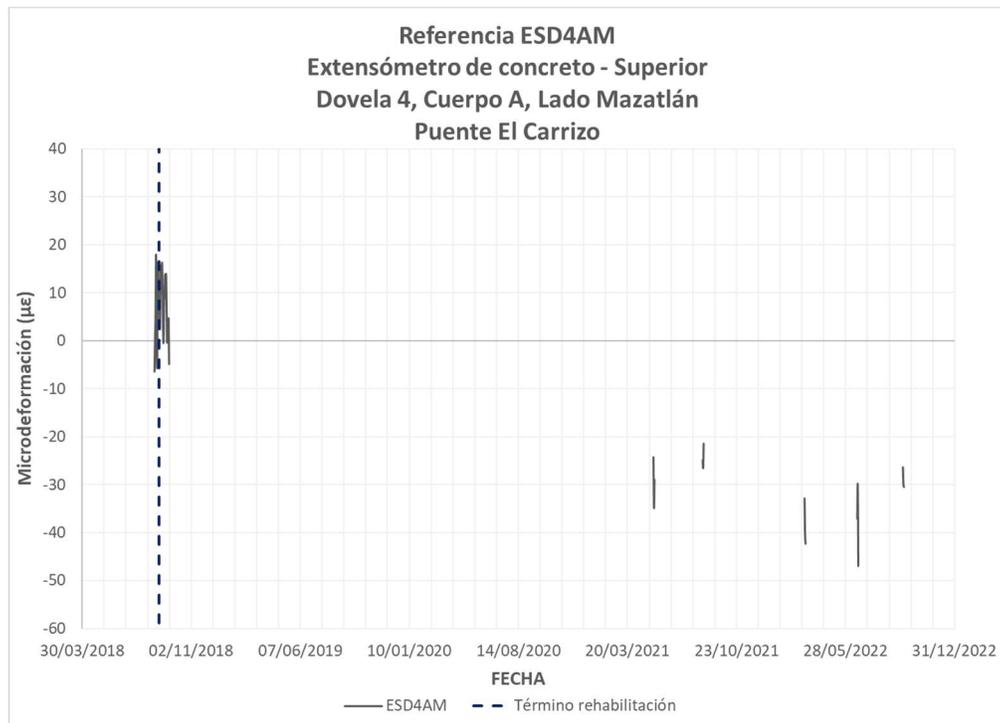


Figura 5.20 Valor de referencia de deformación del sensor ESD4AM

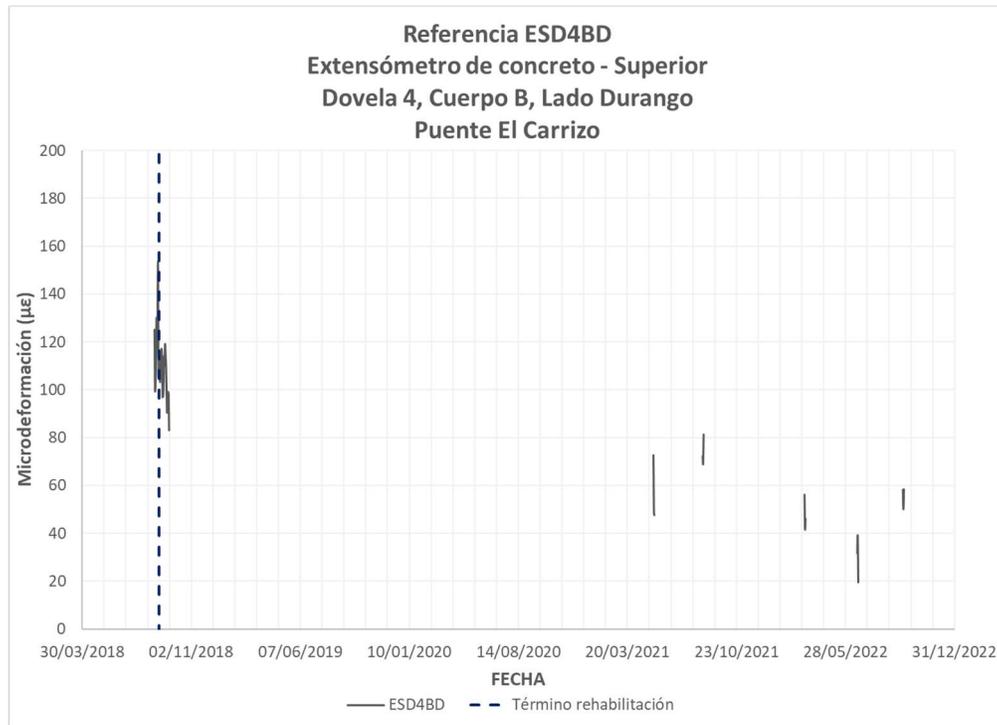


Figura 5.21 Valor de referencia de deformación del sensor ESD4BD

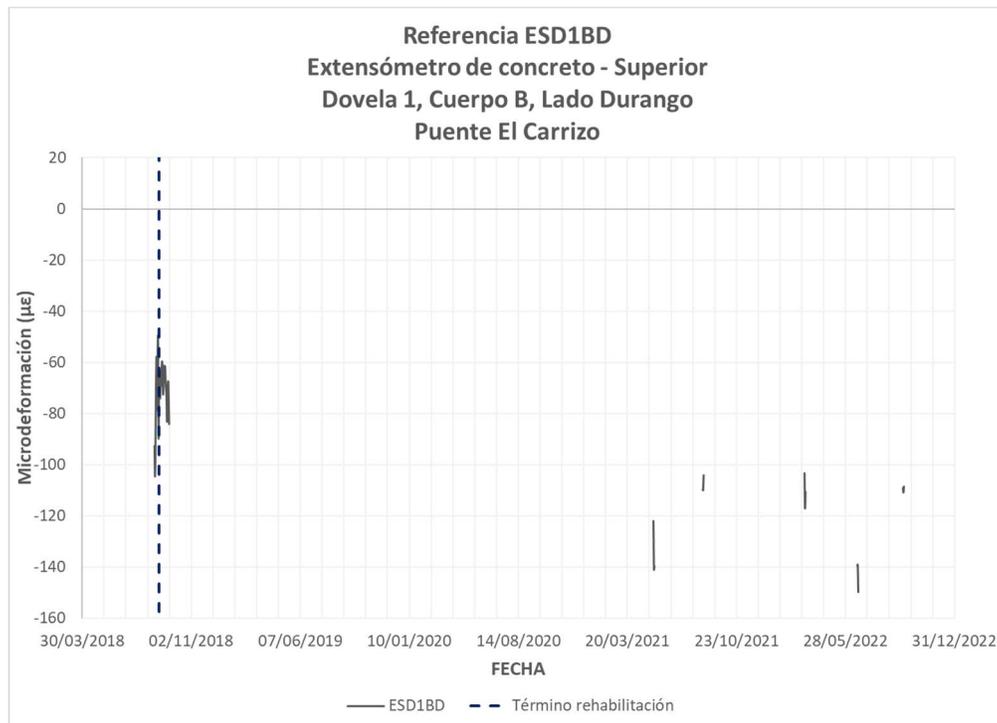


Figura 5.22 Valor de referencia de deformación del sensor ESD1BD

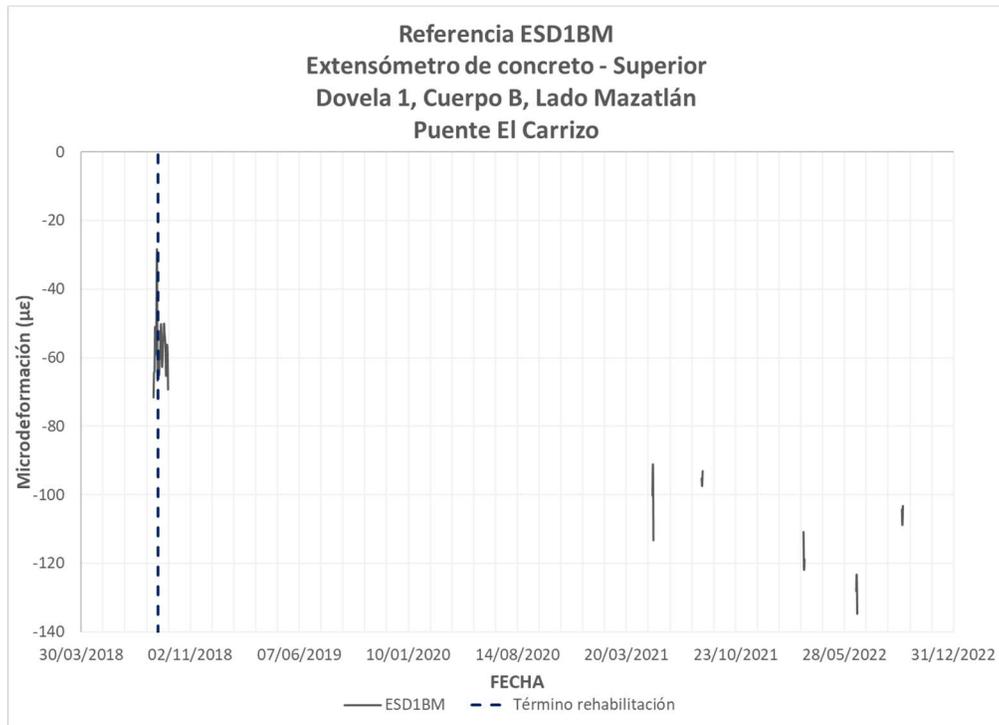


Figura 5.23 Valor de referencia de deformación del sensor ESD1BM

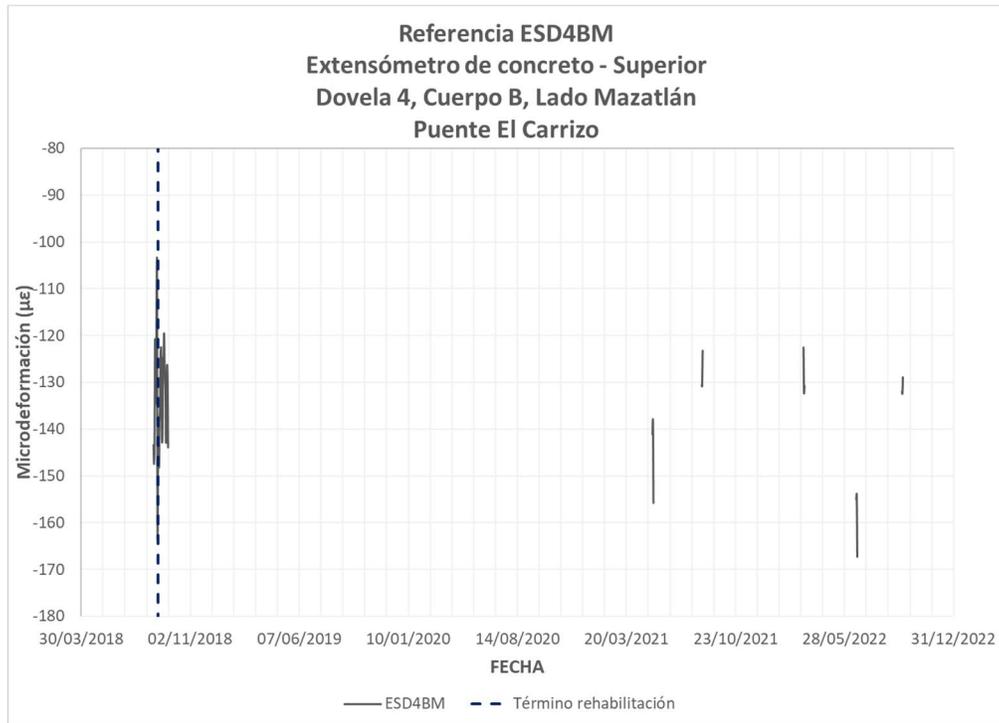


Figura 5.24 Valor de referencia de deformación del sensor ESD4BM

Las figuras 5.25 a 5.32 ilustran, por cada día en las tres sesiones de mediciones, el valor de referencia en microdeformaciones unitarias de los extensómetros instalados en la parte inferior de las dovelas No. 4 y No. 7 de la sección doble voladizo del puente.

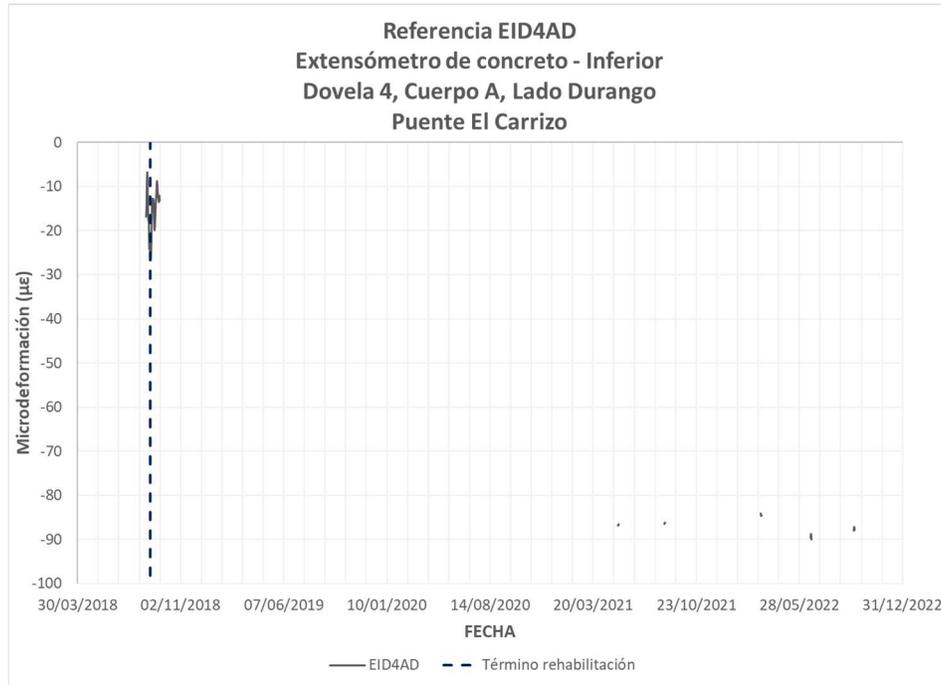


Figura 5.25 Valor de referencia de deformación del sensor EID4AD

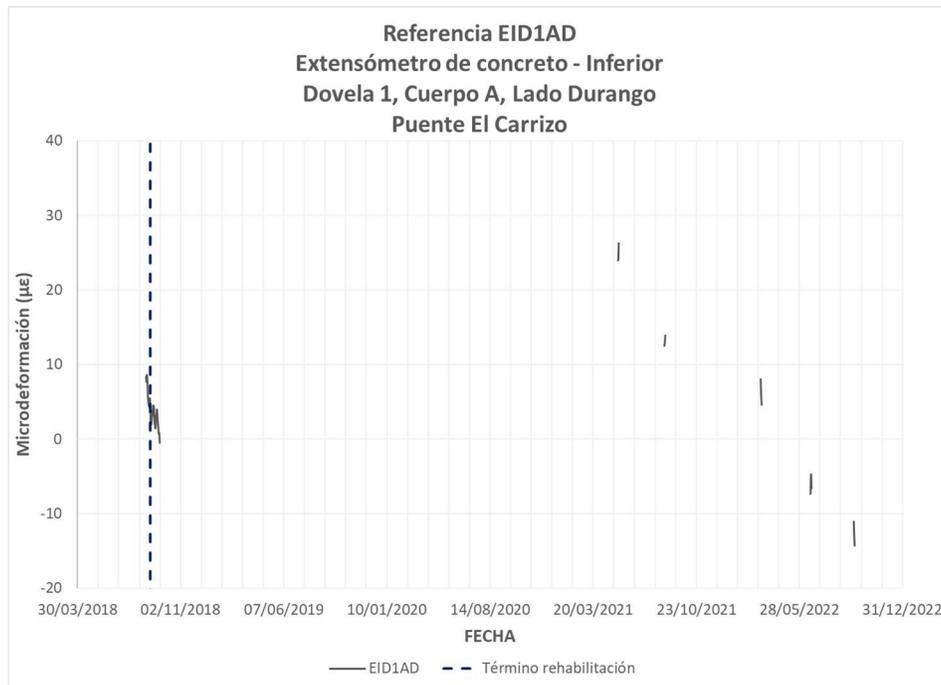


Figura 5.26 Valor de referencia de deformación del sensor EID1AD

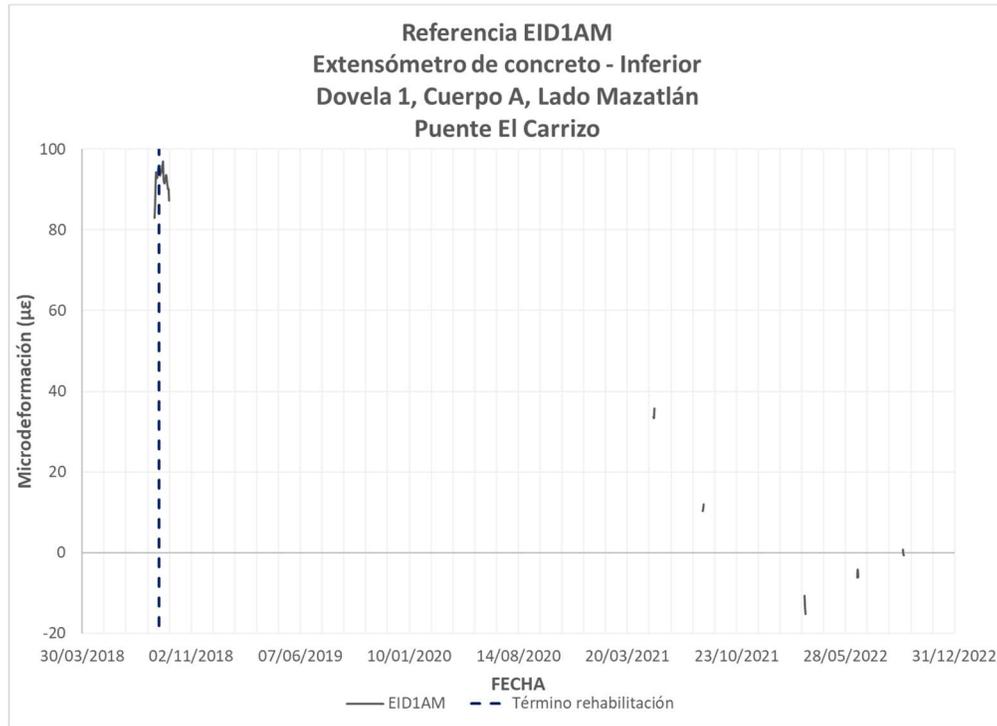


Figura 5.27 Valor de referencia de deformación del sensor EID1AM

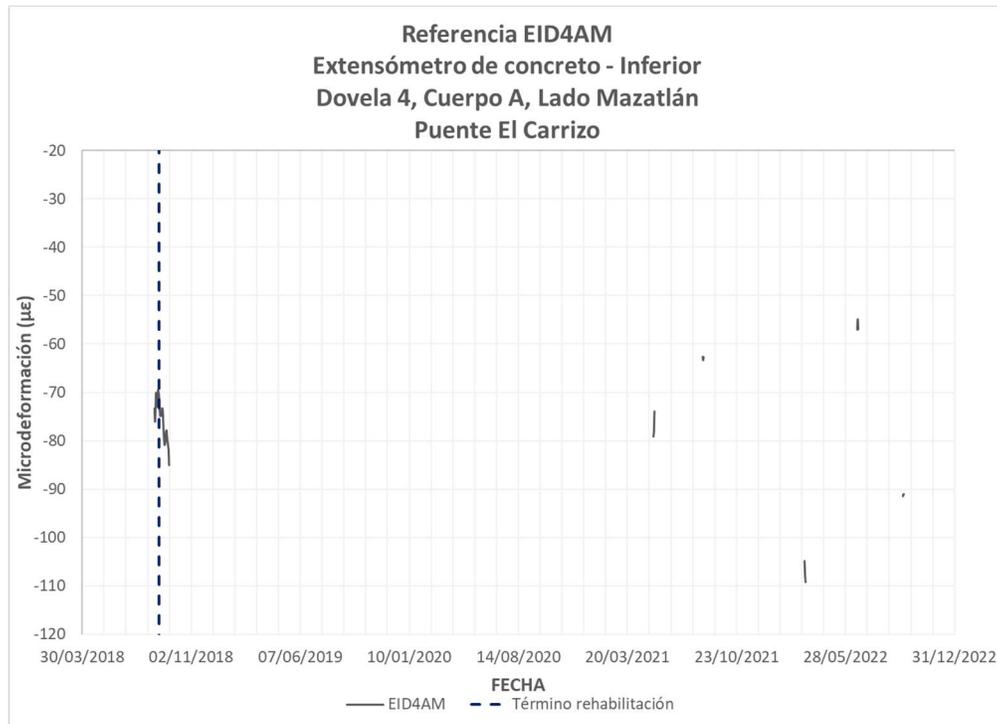


Figura 5.28 Valor de referencia de deformación del sensor EID4AM

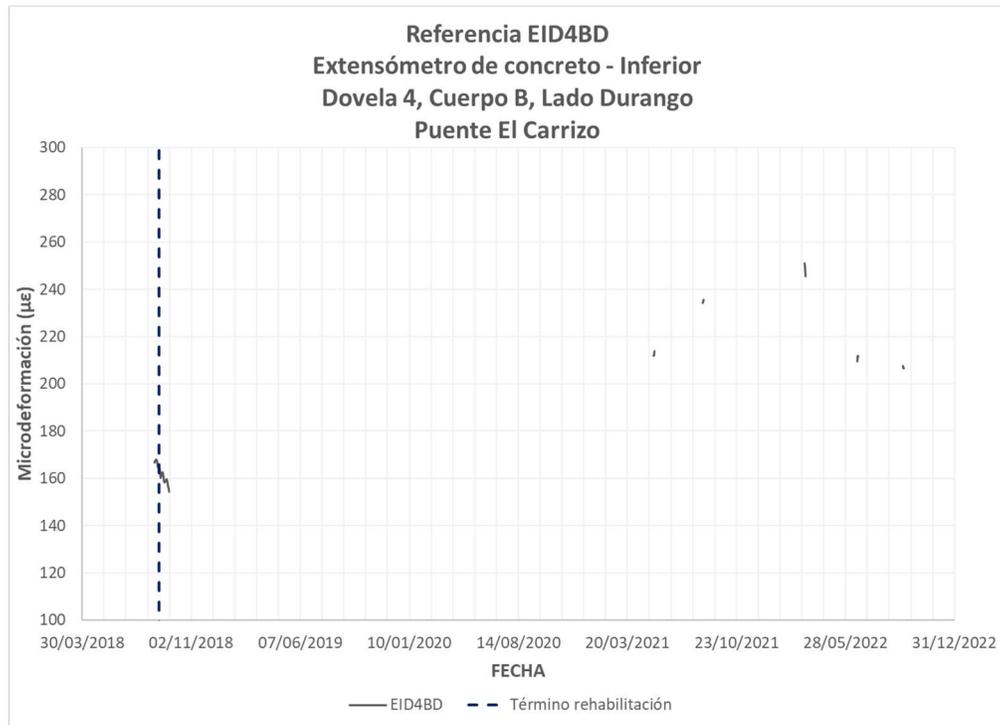


Figura 5.29 Valor de referencia de deformación del sensor EID4BD

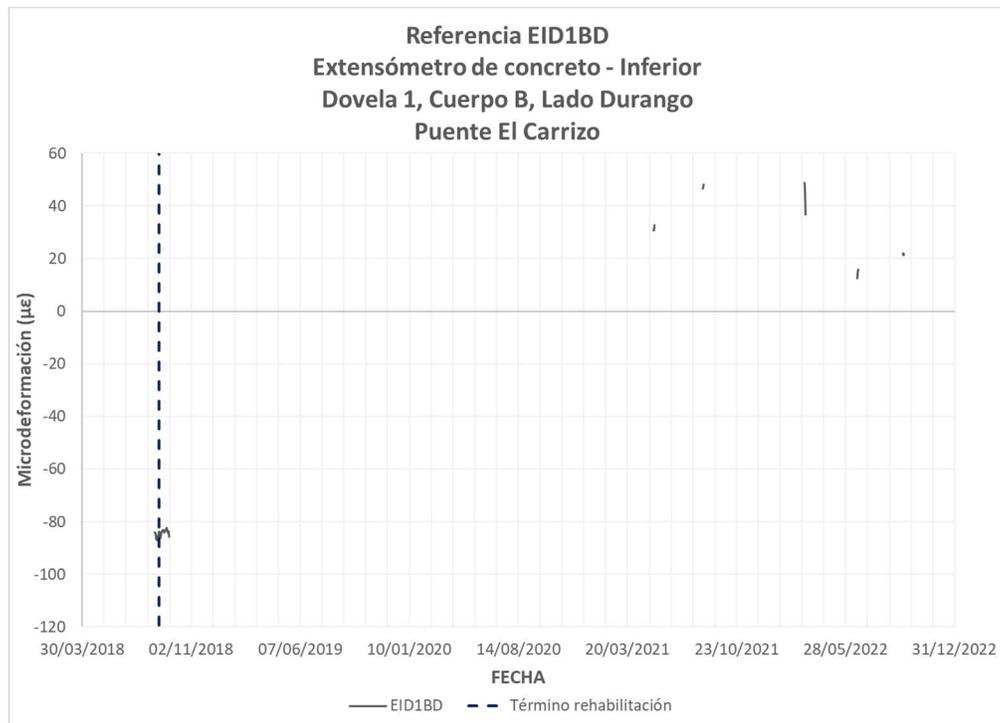


Figura 5.30 Valor de referencia de deformación del sensor EID1BD

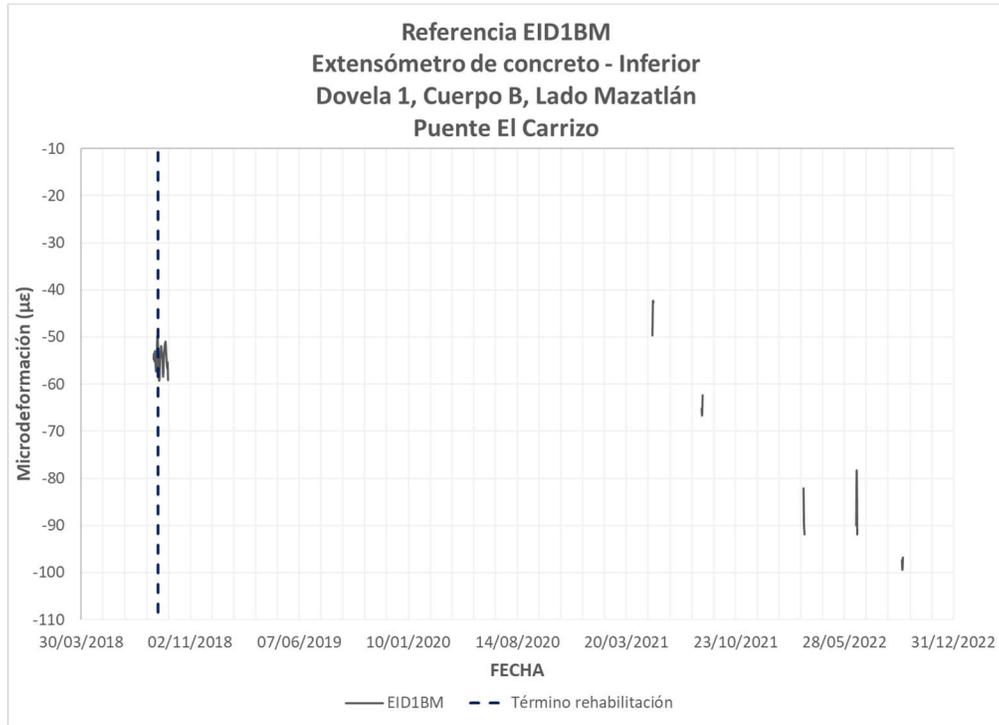


Figura 5.31 Valor de referencia de deformación del sensor EID1BM

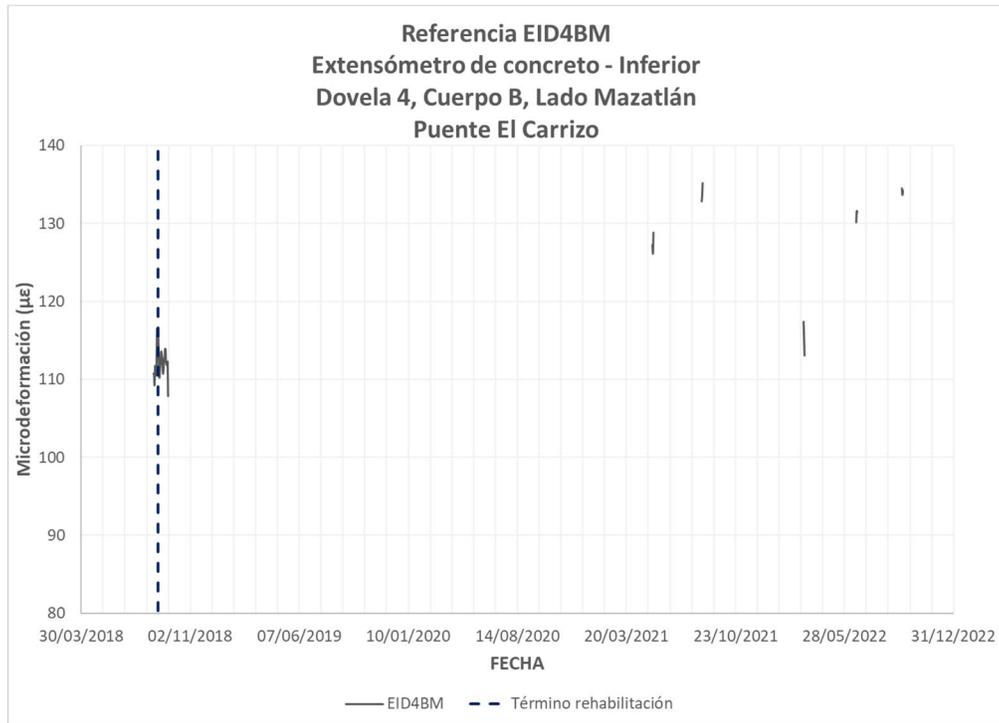


Figura 5.32 Valor de referencia de deformación del sensor EID4BM

Las figuras 5.33 a 5.36 muestran, por cada día en las tres sesiones de mediciones, el valor de referencia, en grados sexagesimales del plano XZ, que corresponde a los cuatro sensores de inclinación instalados en la parte inferior de las dovelas No. 4 y No. 7 de la sección doble voladizo del puente.

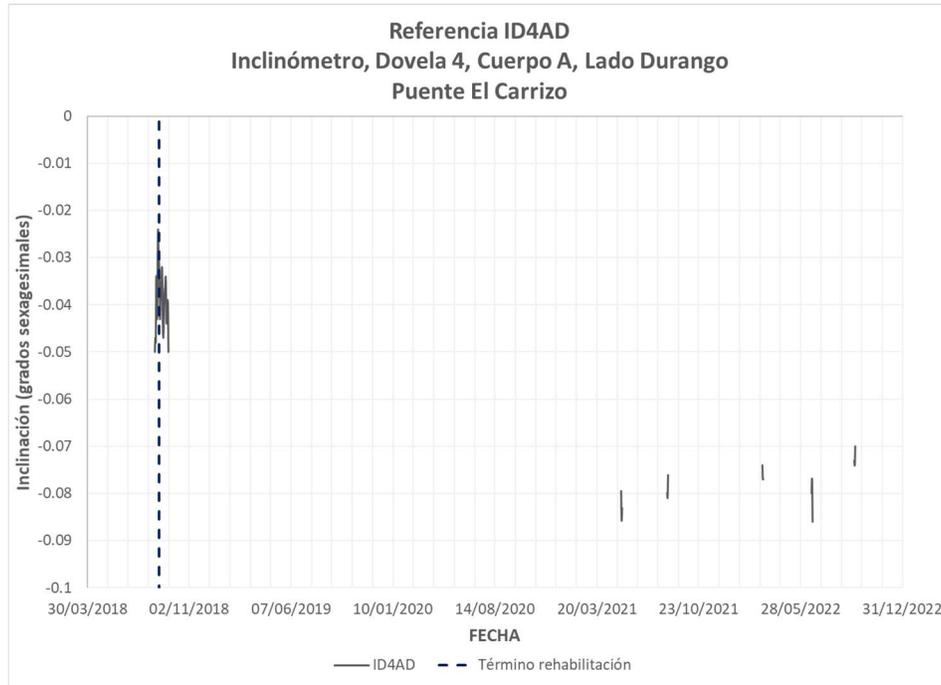


Figura 5.33 Valor de referencia de inclinación del sensor ID4AD

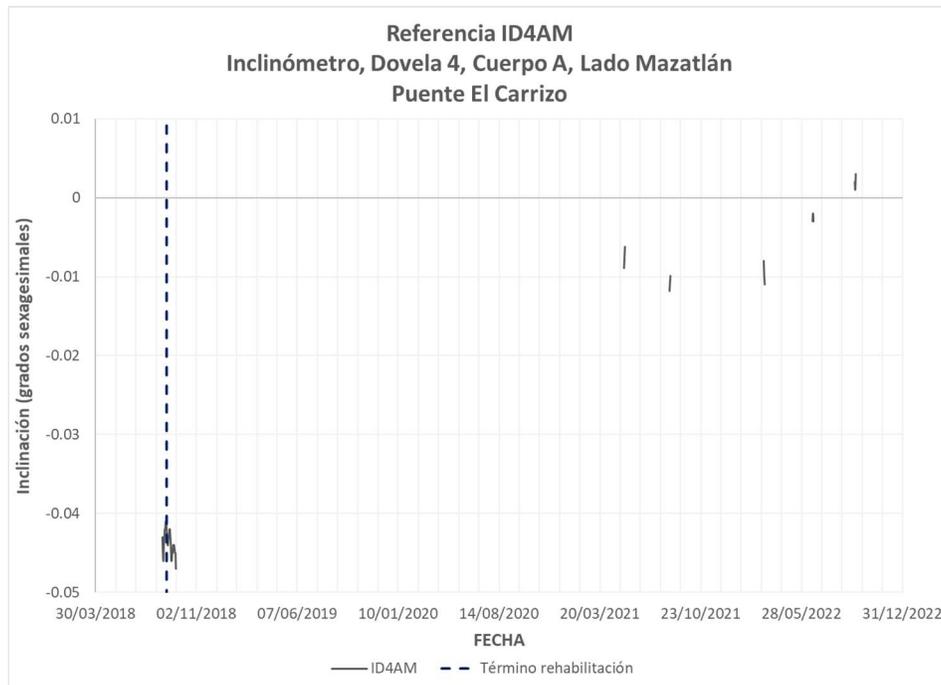


Figura 5.34 Valor de referencia de inclinación del sensor ID4AM

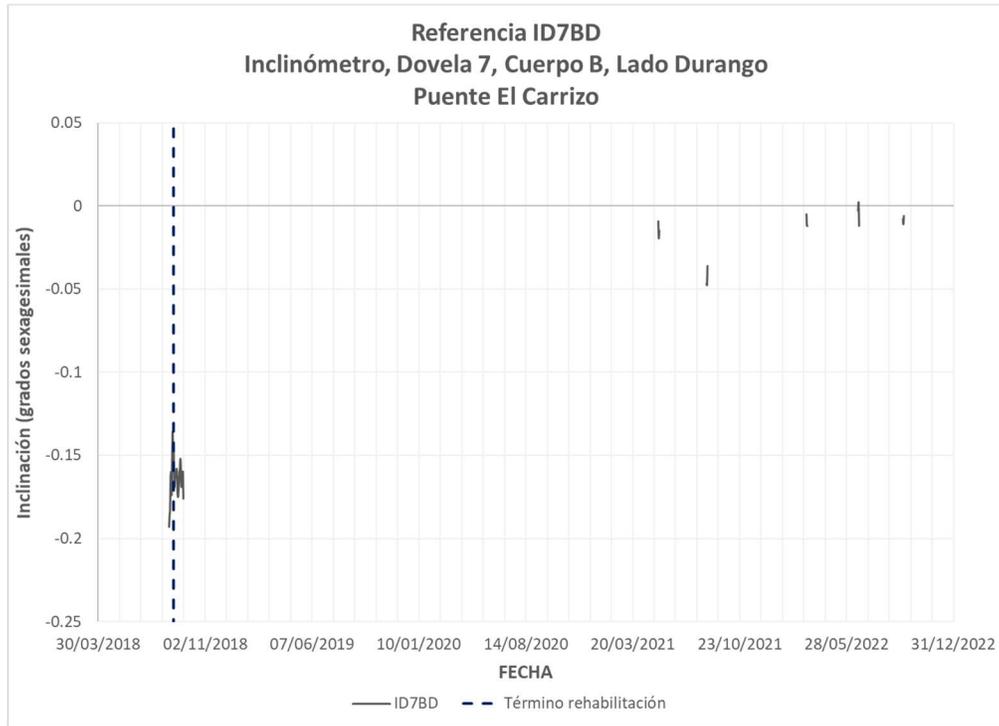


Figura 5.35 Valor de referencia de inclinación del sensor ID7BD

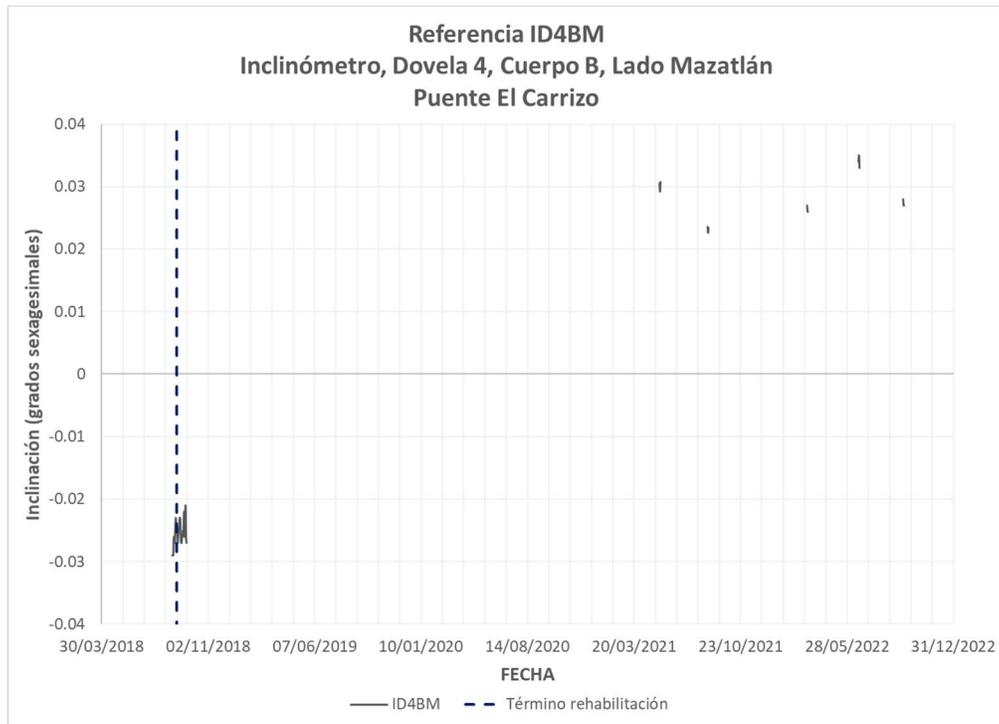


Figura 5.36 Valor de referencia de inclinación del sensor ID4BM

5.1.3 Centroide en dovelas instrumentadas

Con la información del modelo de elementos finitos del puente el Carrizo y los datos de deformación por carga viva de los extensómetros inferior y superior de cada una de las dovelas instrumentadas, se dio seguimiento al valor del centroide de las dovelas del cuerpo A y B. En la figura 5.37 se muestra el esquema de deformación por flexión.

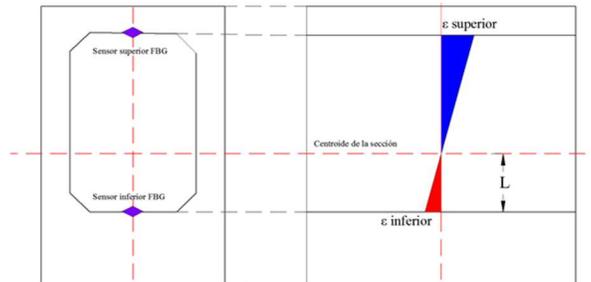


Figura 5.37 Deformación por flexión en dovelas debido a carga viva

En la tabla 5.3 se observan los resultados de los datos experimentales correspondiente a eventos extraordinarios registrados en las ocho dovelas durante las dos sesiones de medición en 2021, así como los valores ideales obtenidos a través del modelo matemático.

Tabla 5.3 Posición del centroide en metros para las dovelas del doble voladizo

Fecha	D4AD	D4BD	D1AD	D1BD	D1AM	D1BM	D4AM	D4BM
MEF	1.34	1.34	0.74	0.74	1.26	1.26	0.92	0.92
2018	1.28	1.40	0.78	0.71	1.16	1.37	1.1	0.75
2021	1.23	1.56	0.58	0.71	0.84	1.74	1.06	0.49
08-mar-22	1.42	1.75	0.57	0.67	0.77	1.95	1.23	0.46
09-mar-22	1.63	1.62	0.59	0.64	0.78	1.76	1.26	0.46
10-mar-22	1.49	1.71	0.61	0.63	0.73	1.89	1.27	0.45
21-jul-22	1.27	1.59	0.62	0.57	0.86	1.64	1.08	0.48
22-jul-22	1.14	1.44	0.59	0.57	0.86	1.70	1.11	0.45
23-jul-22	1.13	1.48	0.54	0.58	0.84	1.58	1.03	0.46
20-sep-22	1.36	1.30	0.86	0.76	0.82	1.40	1.00	0.56
21-sep-22	1.40	1.36	0.88	0.74	0.86	1.44	0.95	0.58
22-sep-22	1.37	1.36	0.84	0.77	0.86	1.43	1.06	0.57

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 5.38 a 5.45, se ilustran los resultados de la ubicación estimada del centroide, así como la ubicación obtenida a través del MEF, en metros, para las dovelas instrumentadas de la sección doble voladizo del puente El Carrizo.

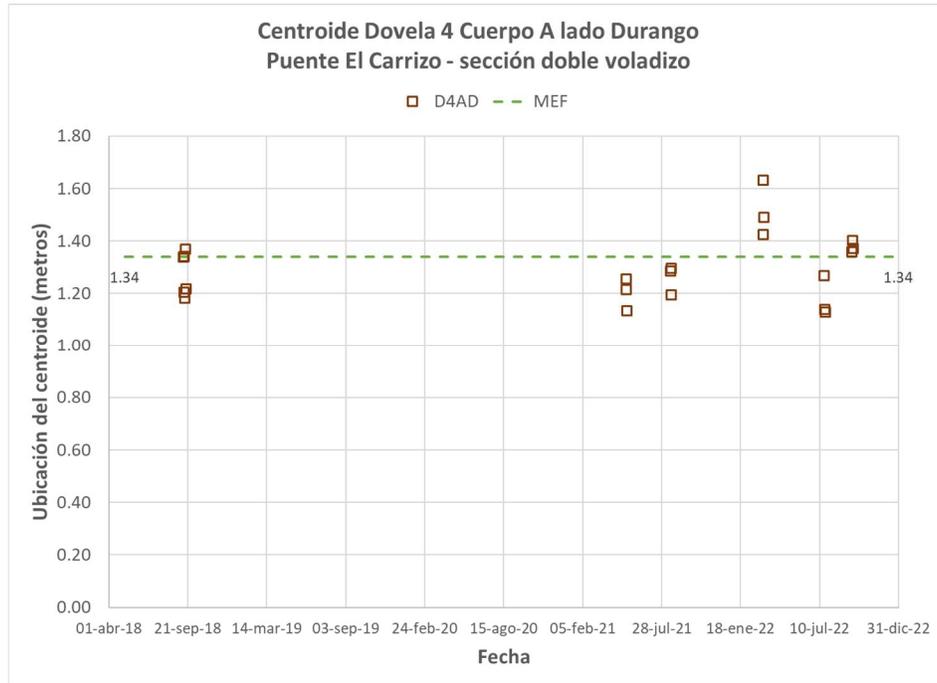


Figura 5.38 Centroide de la Dovela No. 4 lado Durango del cuerpo A

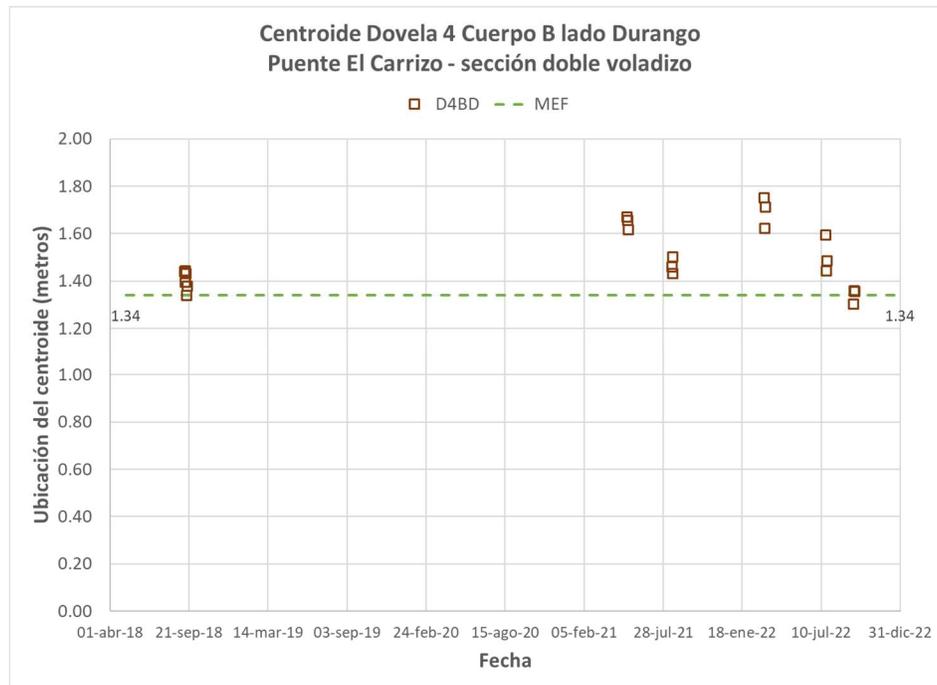


Figura 5.39 Centroide de la Dovela No. 4 lado Durango del cuerpo B

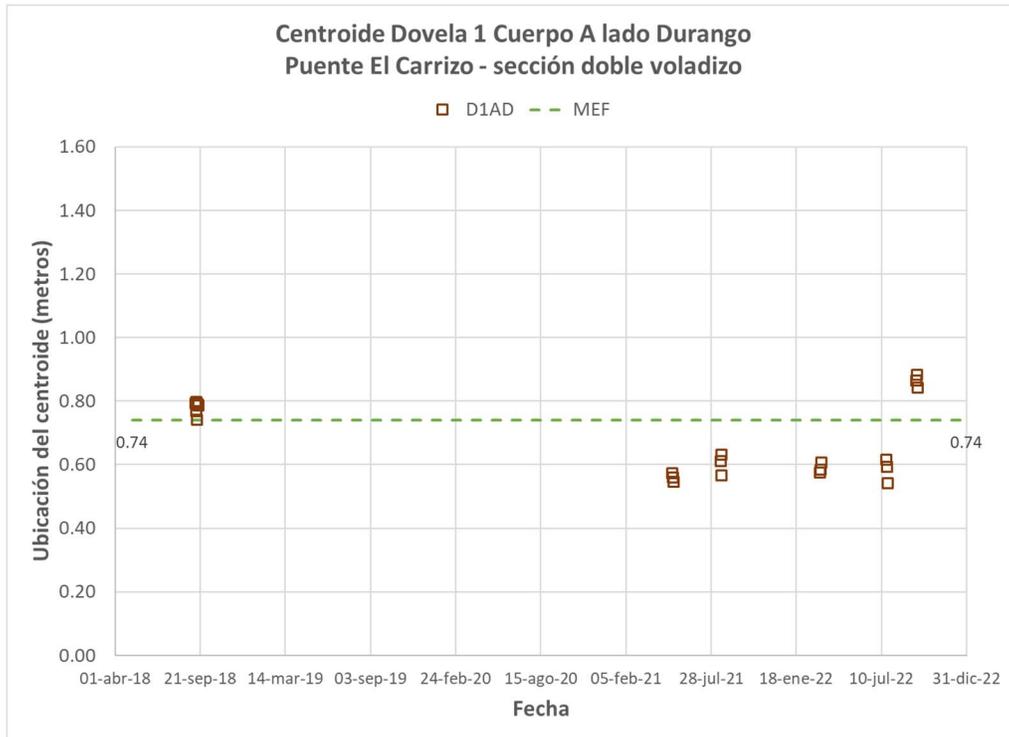


Figura 5.40 Centroide de la Dovela No. 1 lado Durango del cuerpo A

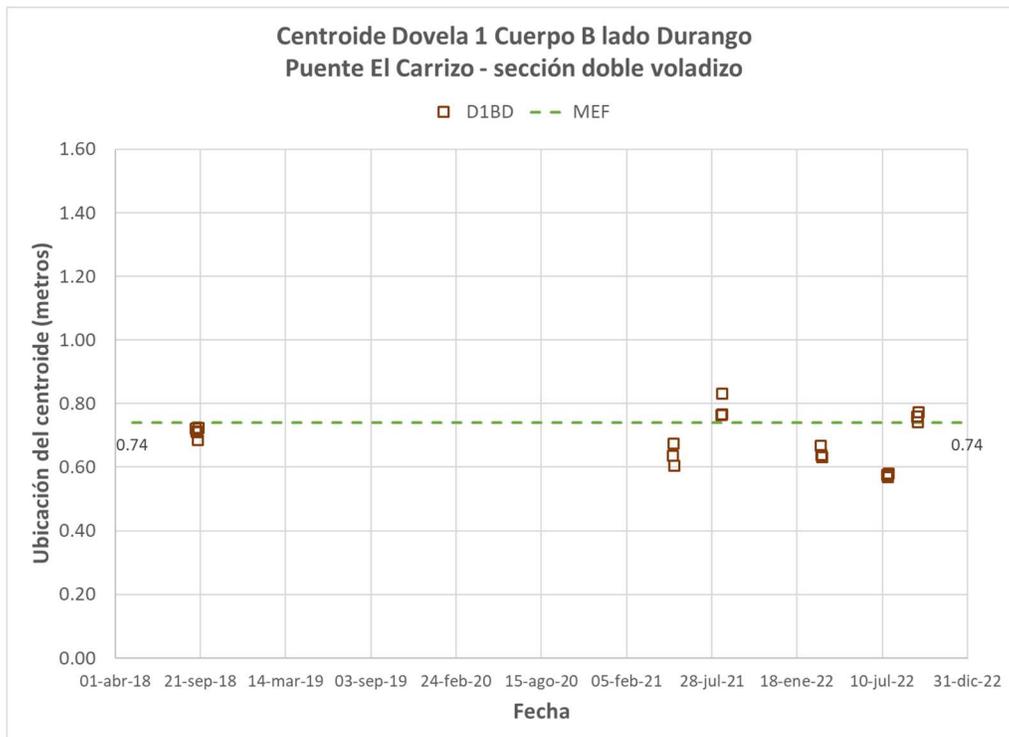


Figura 5.41 Centroide de la Dovela No. 1 lado Durango del cuerpo B

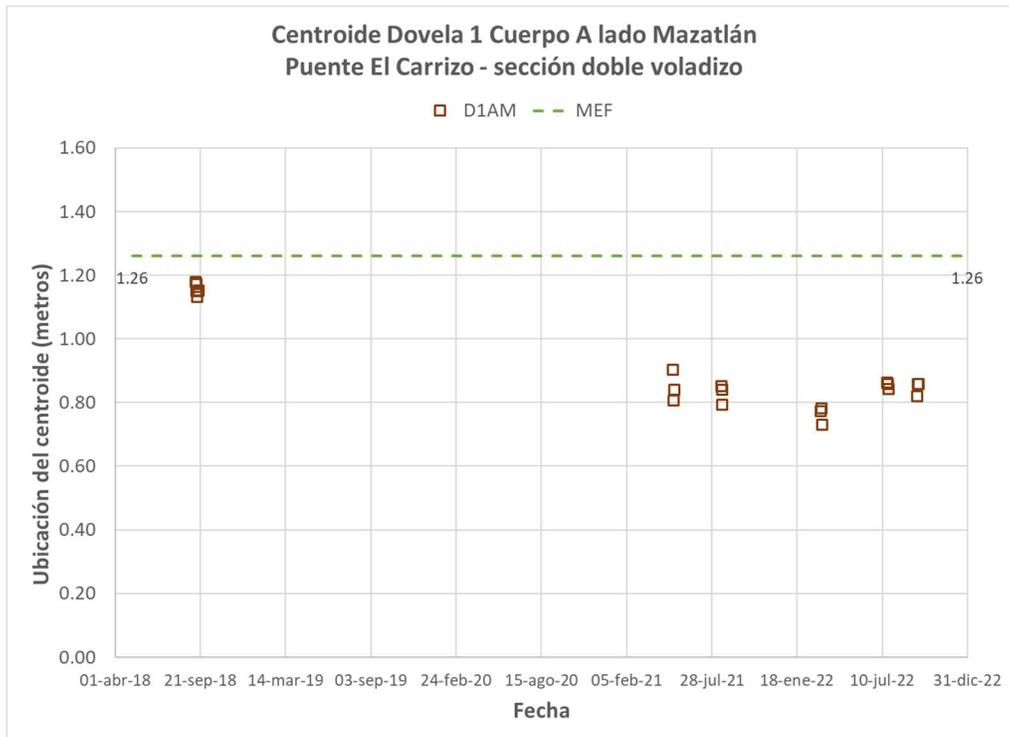


Figura 5.42 Centroide de la Dovela No. 1 lado Mazatlán del cuerpo A

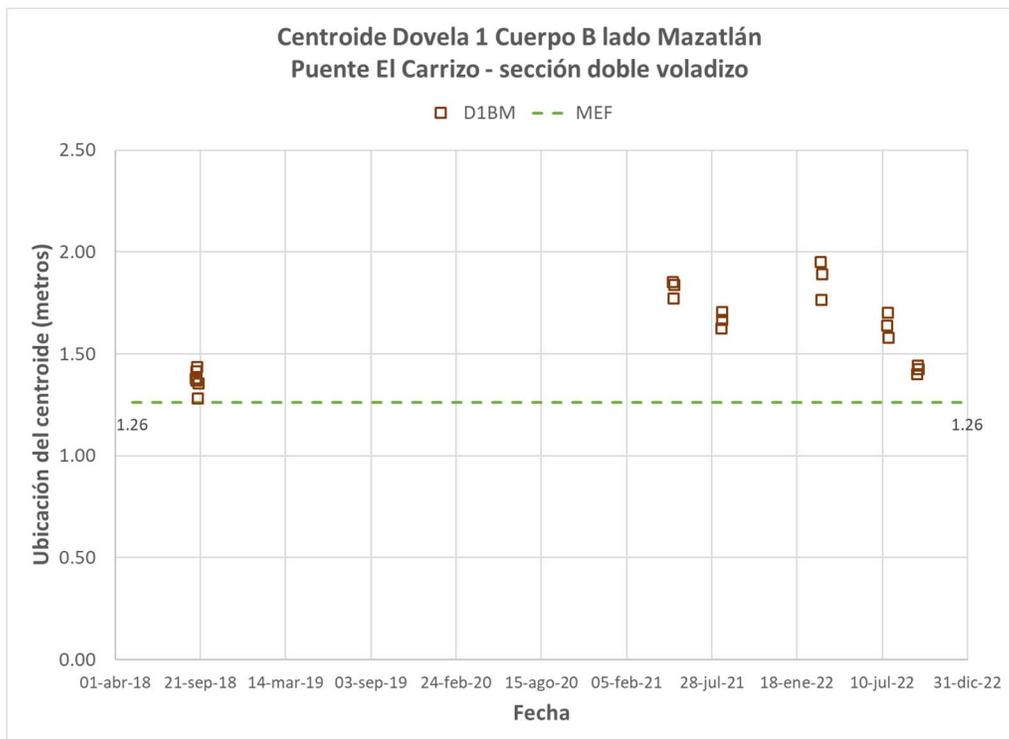


Figura 5.43 Centroide de la Dovela No. 1 lado Mazatlán del cuerpo B

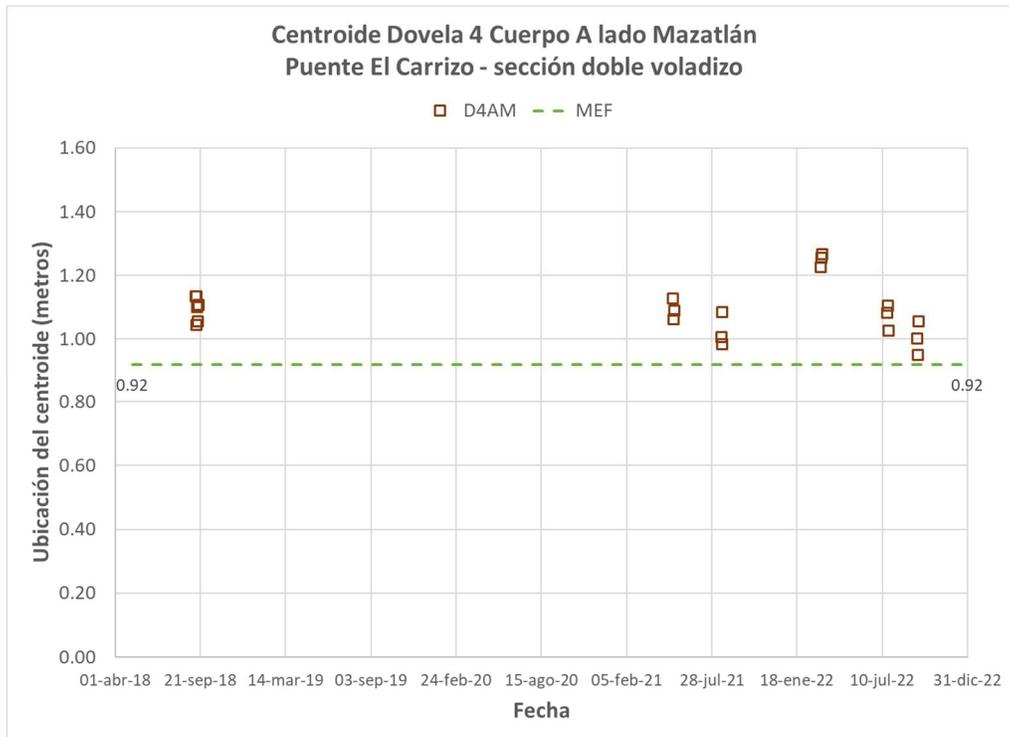


Figura 5.44 Centroide de la Dovela No. 4 lado Mazatlán del cuerpo A

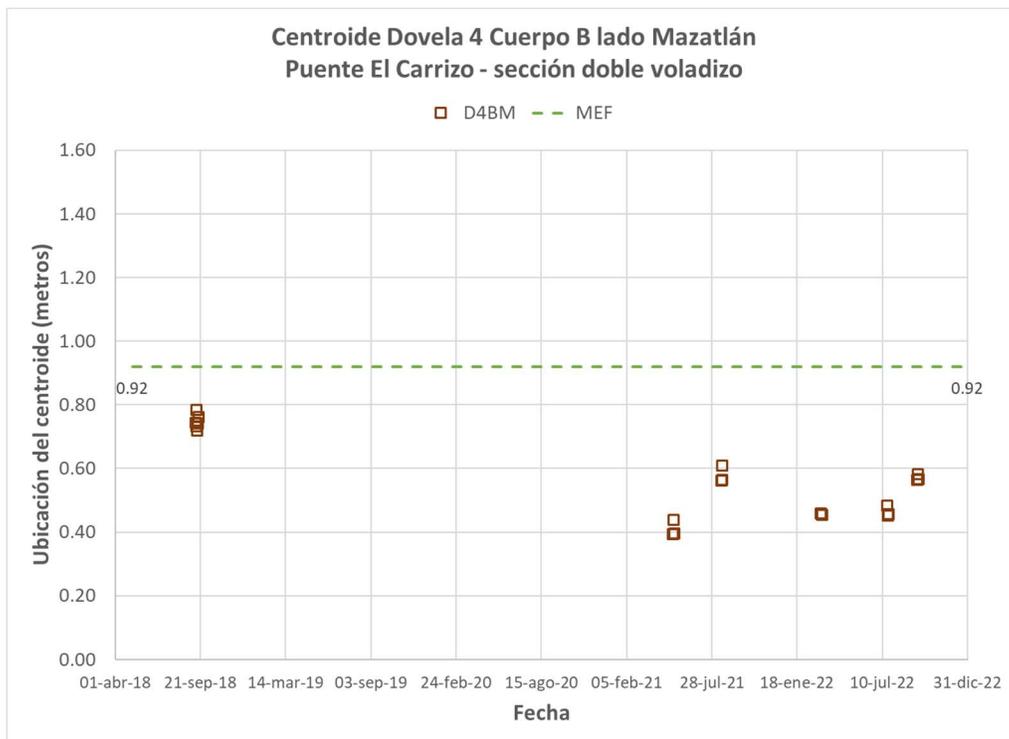


Figura 5.45 Centroide de la Dovela No. 4 lado Mazatlán del cuerpo B

5.1.4 Frecuencias naturales y amortiguamientos

A continuación, se muestra en la tabla 5.4 los resultados de frecuencias naturales, en hertz, y amortiguamiento, en porcentaje, de los primeros tres modos de vibrar en dirección vertical observado en la sección doble voladizo.

Tabla 5.4 Parámetros modales del doble voladizo

Modo	Frec. Natural (Hz)	ζ (%)
1	1.1995	2.77
2	1.5230	2.48
3	2.0132	1.55

5.2 Sección atirantada

5.2.1 Aceleraciones en tablero

En las tablas 5.5 y 5.6 se indican los resultados en el cuerpo A y B, respectivamente, de las aceleraciones máximas y medias, en g [9.81 m/s^2], registradas en la sección atirantada por cada sesión de medición efectuadas en 2022, para las tres direcciones: longitudinal, horizontal y vertical. Así también, se muestran las ubicaciones y distancias, en metros, con respecto al estribo 1, en donde se identificaron los máximos registros de aceleración en cada dirección.

Tabla 5.5 Aceleraciones máximas del tablero de la sección atirantada (cuerpo A)

Fecha	Dirección	Ubicación	Distancia a Estribo 1 (m)	Acel. máx. (g)	Acel. media (g)
10-mar-2022	Longitudinal	AD11	50	0.274	0.053
	Transversal	AD8	86	0.452	0.078
	Vertical	AM4	230	0.273	0.062
23-jun-2022	Longitudinal	No aplica	No aplica	Sin registro	Sin registro
	Transversal	No aplica	No aplica	Sin registro	Sin registro
	Vertical	AM4	230	0.340	0.068
21-sep-2022	Longitudinal	AM4	230	0.343	0.055
	Transversal	AD14	14	0.448	0.158
	Vertical	AM12	326	0.679	0.047

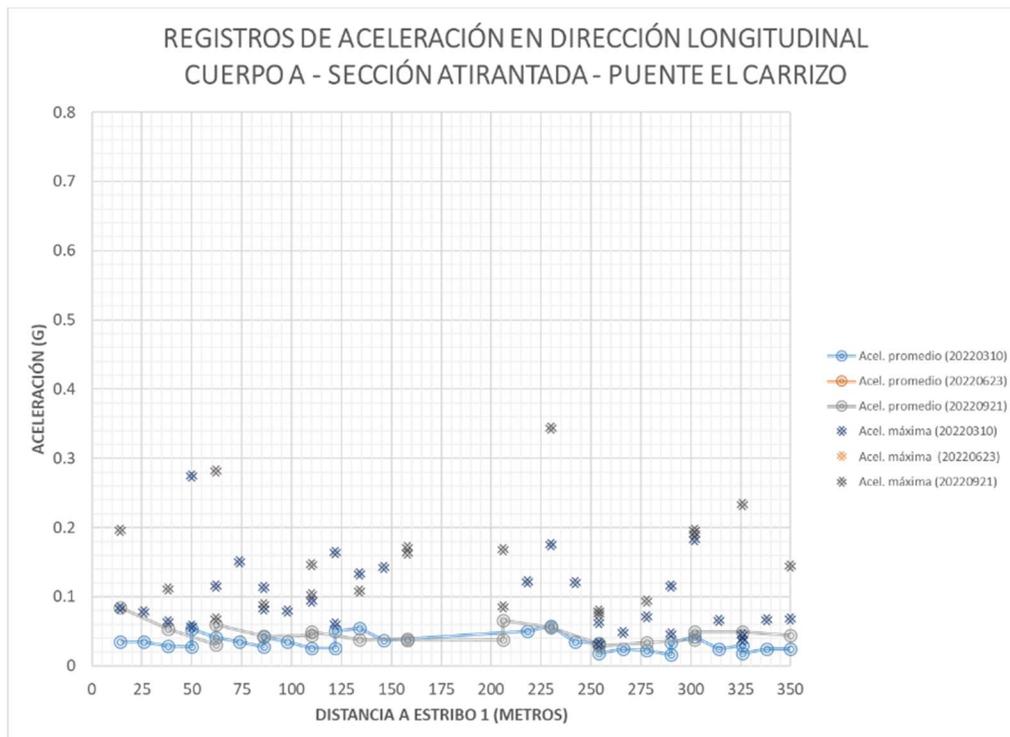
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.6 Aceleraciones máximas del tablero de la sección atirantada (cuerpo B)

Fecha	Dirección	Ubicación	Distancia a Estribo 1 (m)	Acel. máx. (g)	Acel. media (g)
10-mar-2022	Longitudinal	BM6	254	0.331	0.074
	Transversal	BM6	254	0.723	0.130
	Vertical	BD5	122	0.284	0.047
23-jun-2022	Longitudinal	No aplica	No aplica	Sin registro	Sin registro
	Transversal	No aplica	No aplica	Sin registro	Sin registro
	Vertical	BM14	350	0.231	0.044
21-sep-2022	Longitudinal	BD12	38	0.400	0.071
	Transversal	BD4	134	0.641	0.093
	Vertical	BD14	14	0.683	0.103

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 5.46 a 5.51, se ilustran los resultados de las aceleraciones longitudinal, transversal y vertical: promedio y máximas, en g [9.81 m/s^2] del cuerpo A y B, registradas en 2022, para los puntos de instrumentación del tablero del puente de la sección atirantada.

**Figura 5.46 Aceleración en dirección longitudinal del cuerpo A**

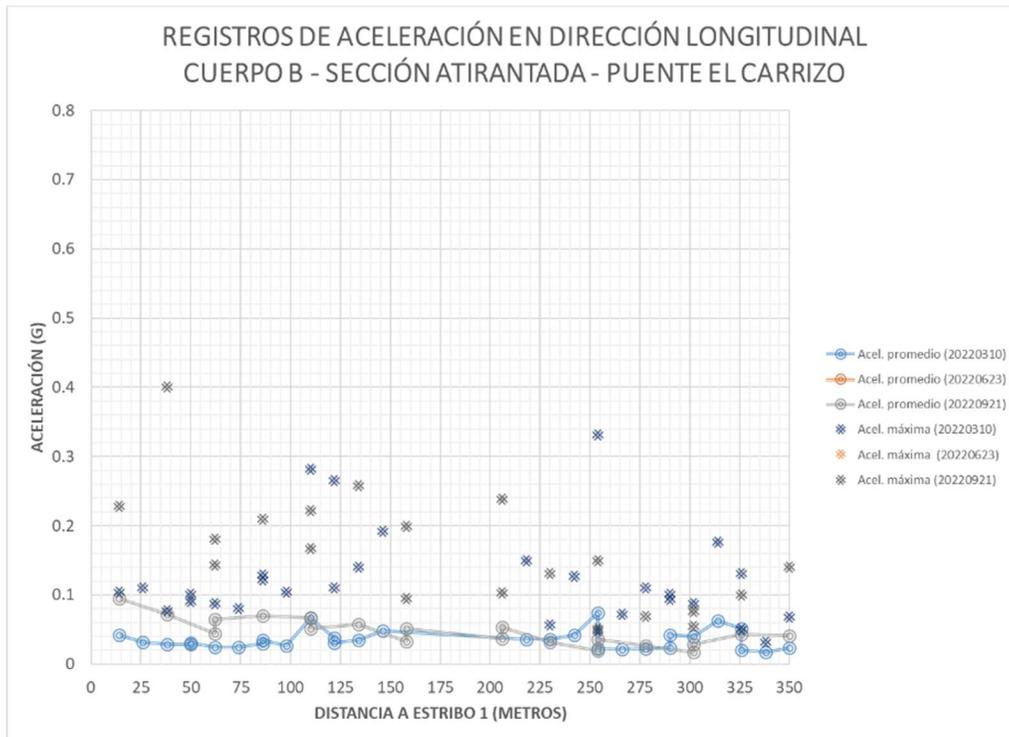


Figura 5.47 Aceleración en dirección longitudinal del cuerpo B

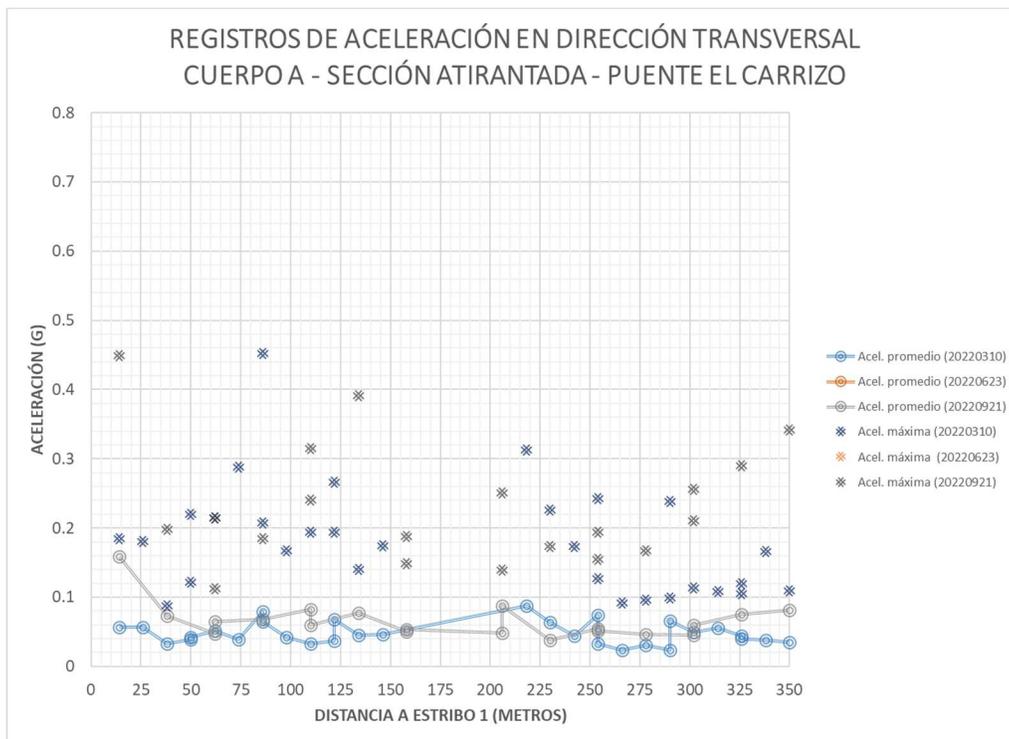


Figura 5.48 Aceleración en dirección transversal del cuerpo A

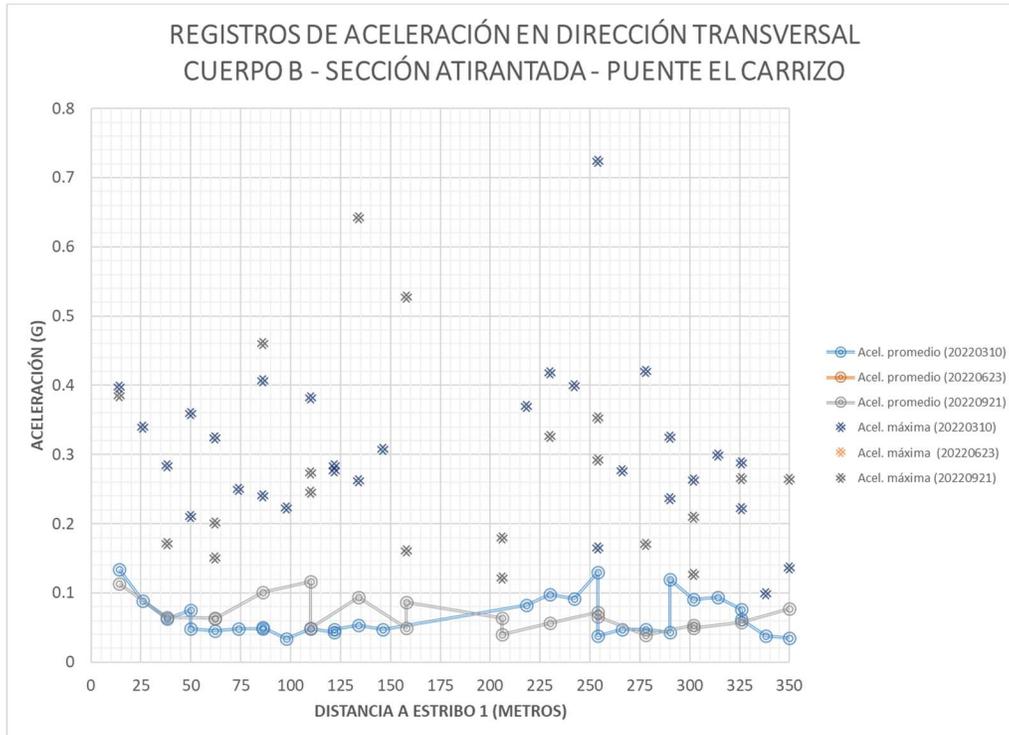


Figura 5.49 Aceleración en dirección transversal del cuerpo B

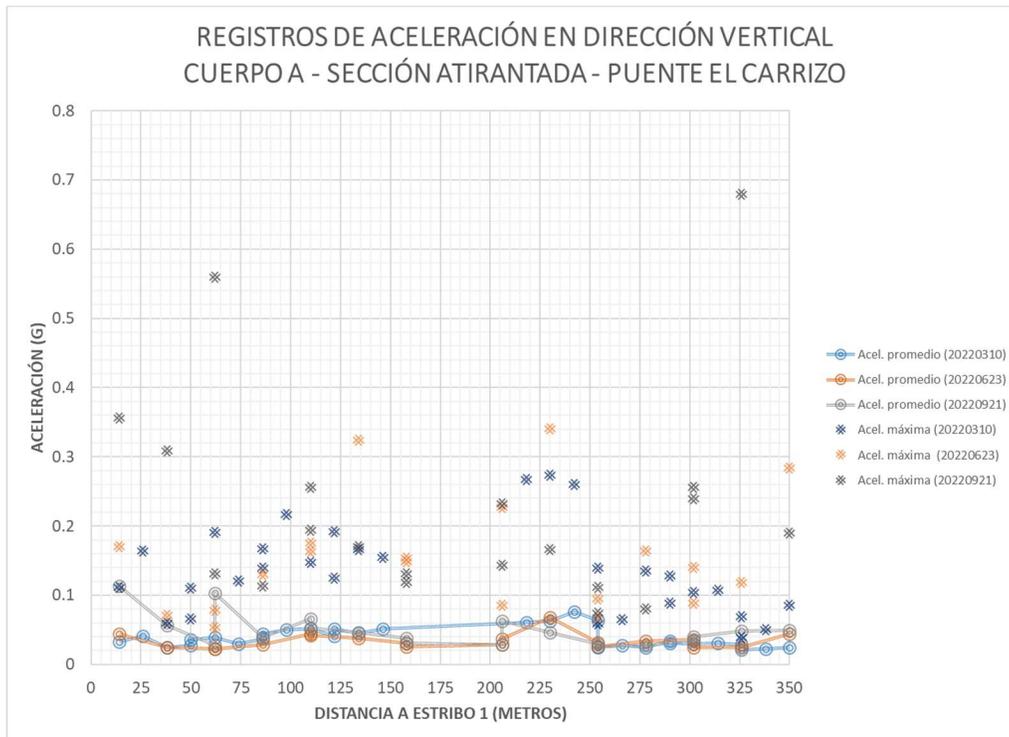


Figura 5.50 Aceleración en dirección vertical del cuerpo A

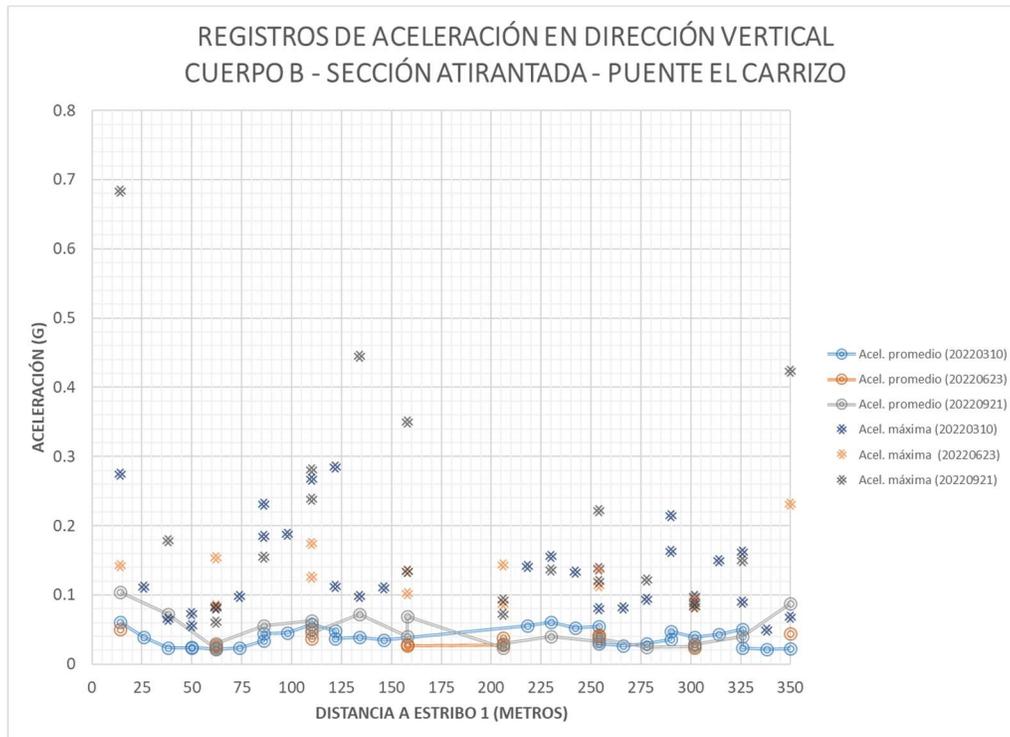


Figura 5.51 Aceleración en dirección vertical del cuerpo B

5.2.2 Tensiones de cables

Las tablas 5.7 a 5.10 muestran los resultados, en toneladas, de las tensiones en los 56 cables que constituyen la sección atirantada del puente El Carrizo, mediante pesajes dinámicos indirectos. En donde, las tensiones para cada cable, se obtienen al aplicar en la ecuación 3.6 los resultados de las frecuencias fundamentales indicadas en las tablas 3.1 a 3.4 y, el factor de calibración de los tirantes indicados en la tabla 3.7. De manera complementaria, se muestran: la tensión media (μ), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación ($C.V.$), obtenidos en cada cable a través de pesajes dinámicos indirectos en 2022.

Tabla 5.7 Resultados, en toneladas, de las tensiones en cables de la semi-arpa 1

Cable	9/mar/22	21/jun/22	20/sep/22	μ	σ	C.V.
1	120.2	111.3	118.7	116.7	4.8	4.1%
2	152.2	145.3	151.4	149.7	3.8	2.5%
3	152.9	147.8	154.2	151.6	3.4	2.2%
4	206.4	Sin registro	197.9	202.1	6.0	3.0%
5	208.5	203.1	206.4	206.0	2.7	1.3%
6	225.4	224.5	226.3	225.4	0.9	0.4%
7	184.3	186.2	189.2	186.6	2.4	1.3%
8	193.6	193.3	196.1	194.3	1.5	0.8%
9	241.6	240.3	241.0	241.0	0.7	0.3%
10	214.0	216.5	221.1	217.2	3.6	1.7%
11	355.4	Sin registro	368.7	362.0	9.4	2.6%
12	356.7	360.6	363.0	360.1	3.2	0.9%
13	398.5	396.7	395.5	396.9	1.5	0.4%
14	486.9	479.4	487.0	484.4	4.4	0.9%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.8 Resultados, en toneladas, de las tensiones en cables de la semi-arpa 2

Cable	9/mar/22	21/jun/22	20/sep/22	μ	σ	C.V.
1	107.3	106.9	112.3	108.8	3.0	2.8%
2	159.9	166.0	163.8	163.3	3.1	1.9%
3	156.3	156.2	153.9	155.5	1.4	0.9%
4	154.6	Sin registro	156.4	155.5	1.3	0.8%
5	142.2	143.0	146.2	143.8	2.1	1.5%
6	161.0	163.4	159.5	161.3	1.9	1.2%
7	273.4	278.6	275.9	276.0	2.6	0.9%
8	222.4	227.1	226.8	225.4	2.6	1.2%
9	196.3	199.1	199.2	198.2	1.6	0.8%
10	216.3	218.8	216.5	217.2	1.4	0.6%
11	368.6	Sin registro	370.6	369.6	1.4	0.4%
12	336.1	336.0	333.9	335.3	1.2	0.4%
13	334.2	329.8	334.0	332.7	2.5	0.8%
14	538.2	534.4	520.9	531.2	9.1	1.7%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.9 Resultados, en toneladas, de las tensiones en cables de la semi-arpa 3

Cable	9/mar/22	21/jun/22	20/sep/22	μ	σ	C.V.
1	69.3	69.7	70.9	70.0	0.9	1.2%
2	155.3	154.5	156.6	155.5	1.0	0.7%
3	157.9	153.0	155.5	155.5	2.4	1.6%
4	193.4	Sin registro	203.1	198.3	6.8	3.4%
5	153.0	151.1	150.7	151.6	1.2	0.8%
6	176.6	176.2	171.9	174.9	2.6	1.5%
7	251.8	252.9	253.3	252.6	0.8	0.3%
8	240.5	238.9	243.5	241.0	2.3	1.0%
9	194.9	193.5	194.6	194.3	0.8	0.4%
10	191.0	190.3	190.0	190.5	0.5	0.3%
11	399.3	Sin registro	398.5	398.9	0.6	0.1%
12	363.3	359.0	362.1	361.5	2.2	0.6%
13	344.1	345.4	346.3	345.3	1.1	0.3%
14	543.8	541.3	549.0	544.7	3.9	0.7%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.10 Resultados, en toneladas, de las tensiones en cables de la semi-arpa 4

Cable	9/mar/22	21/jun/22	20/sep/22	μ	σ	C.V.
1	107.5	108.3	110.7	108.8	1.7	1.5%
2	158.7	149.3	158.5	155.5	5.4	3.5%
3	171.4	163.6	166.4	167.1	3.9	2.3%
4	200.0	Sin registro	196.5	198.2	2.5	1.2%
5	203.8	199.2	203.4	202.1	2.5	1.3%
6	231.2	232.8	235.7	233.2	2.2	1.0%
7	169.4	169.7	174.1	171.0	2.6	1.5%
8	237.0	235.2	239.1	237.1	2.0	0.8%
9	193.6	194.0	195.4	194.3	0.9	0.5%
10	229.9	229.9	228.1	229.3	1.0	0.5%
11	370.7	Sin registro	375.6	373.1	3.5	0.9%
12	364.5	367.5	364.1	365.4	1.8	0.5%
13	419.0	421.4	418.8	419.7	1.4	0.3%
14	512.1	511.9	511.9	512.0	0.1	0.0%

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 5.52 a 5.55 muestran por cada semi-arpa, la tensión de diseño, la tensión máxima de diseño representado por el 45% F_{pu} (Fuerza de ruptura), el límite elástico, el primer pesaje directo (septiembre de 2013), último pesaje directo (septiembre de 2018) y el último pesaje indirecto (septiembre de 2022), obtenido mediante el análisis de la respuesta dinámica de los cables.

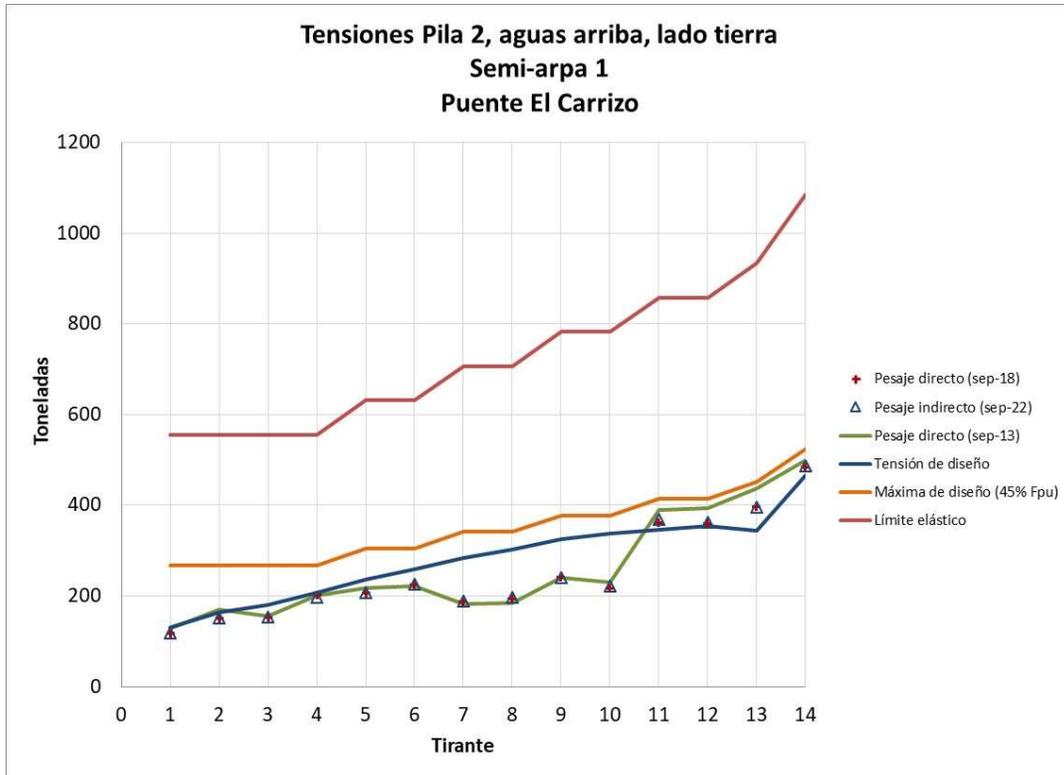


Figura 5.52 Tensiones en tirantes de la Pila 2, aguas arriba, lado tierra

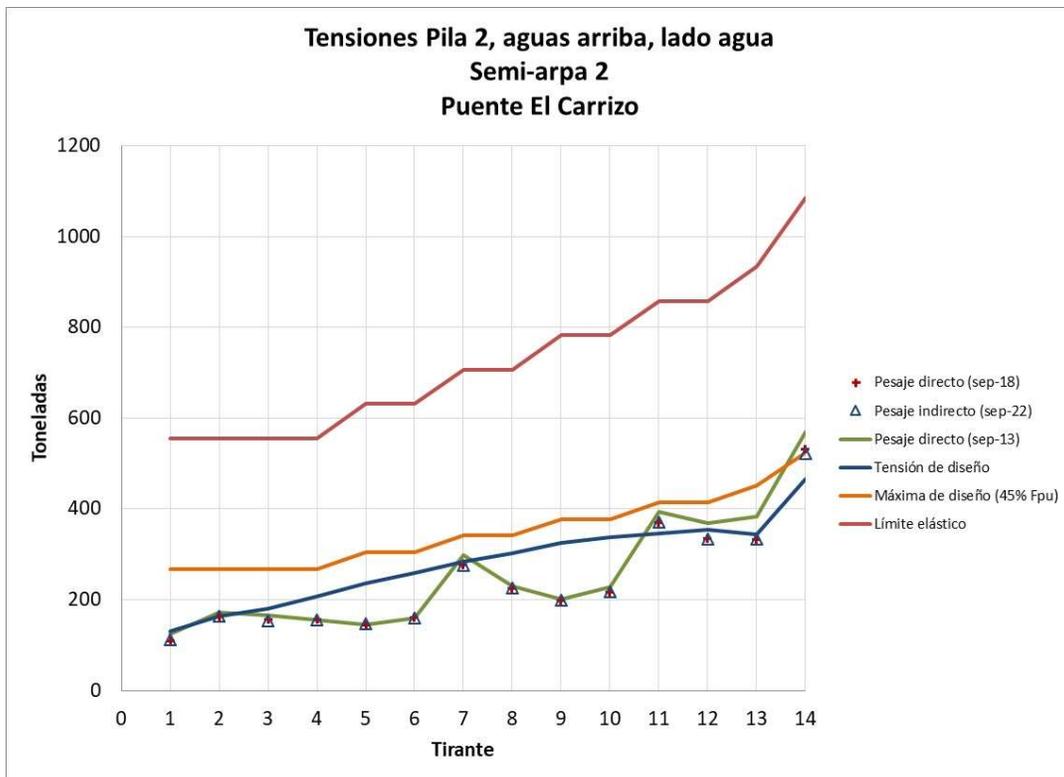


Figura 5.53 Tensiones en tirantes de la Pila 2, aguas arriba, lado agua

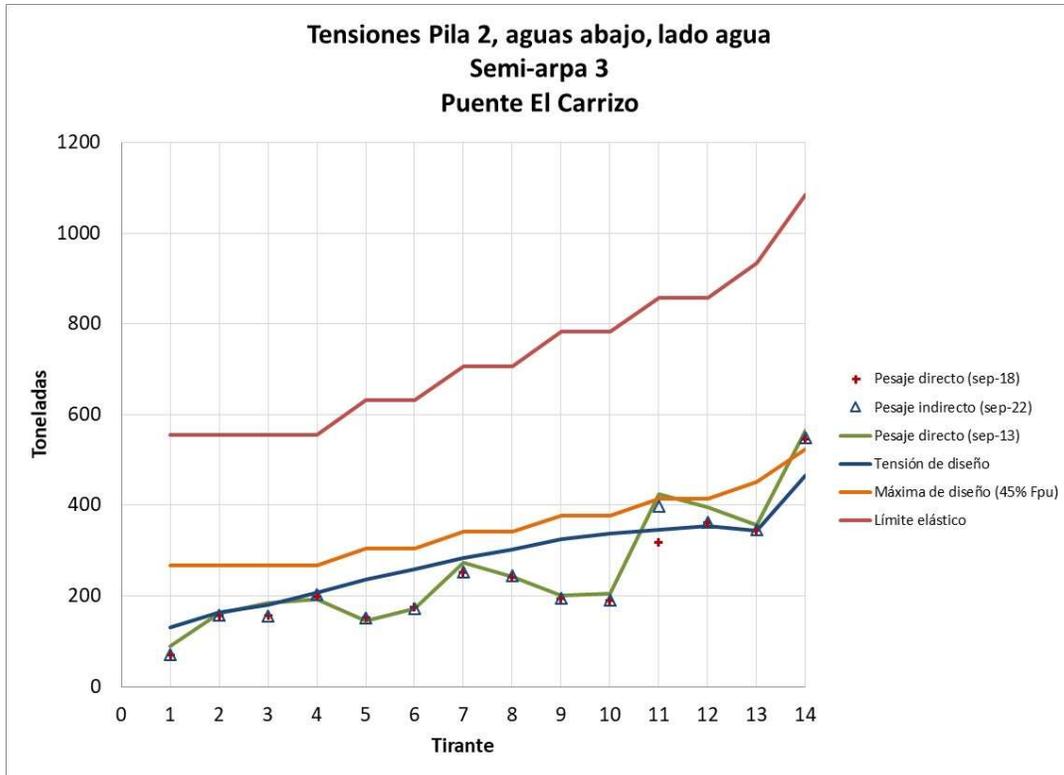


Figura 5.54 Tensiones en tirantes de la Pila 2, aguas abajo, lado agua

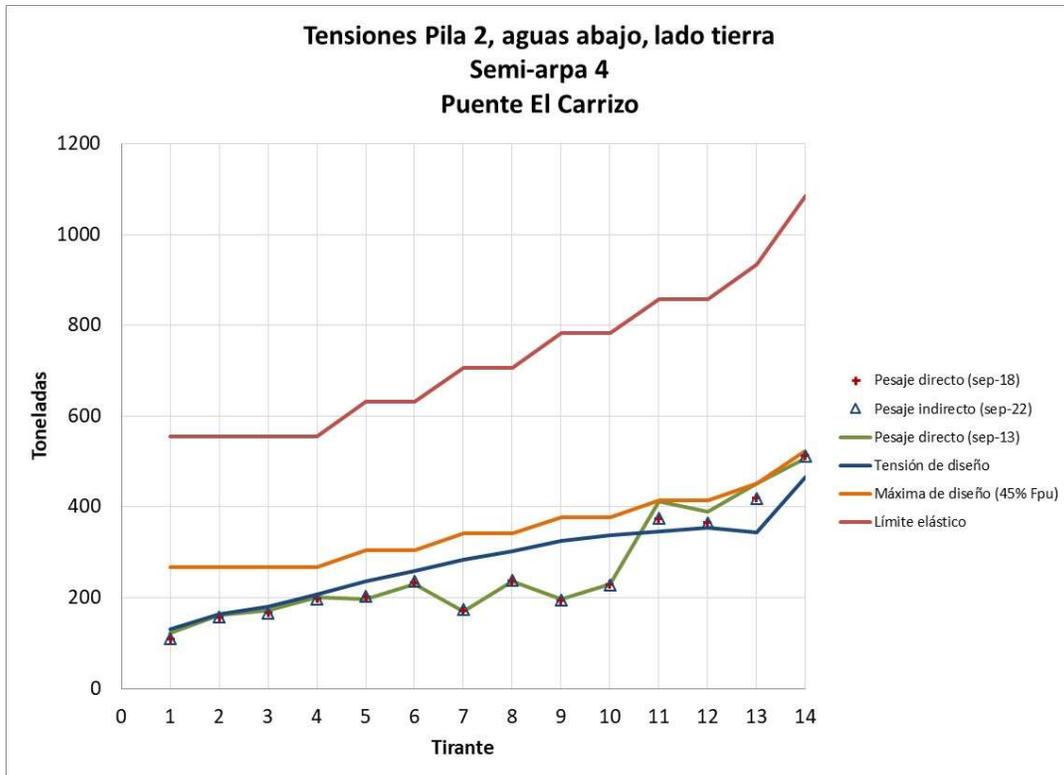


Figura 5.55 Tensiones en tirantes de la Pila 2, aguas abajo, lado tierra

5.2.3 Frecuencias naturales y amortiguamientos

Finalmente, en la tabla 5.11 se muestran los resultados de frecuencias naturales, en hertz, y amortiguamiento, en porcentaje, de los primeros nueve modos de vibrar en dirección vertical observado en la sección atirantada del puente El Carrizo. Mientras que, en la tabla 5.12, se plasman una comparativa de la variación en frecuencia de algunos modos de vibrar respecto a los obtenido en 2013 por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Gómez et al., 2014). De lo anterior, se observa que el primer modo, que actualmente corresponde a 0.26 hertz, tuvo una disminución en frecuencia del 10%, siendo -0.03 Hz, respecto a la frecuencia estimada en 2013.

Tabla 5.11 Resultados modales identificados en 2022

Modo	marzo		junio		septiembre	
	Frecuencia (Hz)	ζ (%)	Frecuencia (Hz)	ζ (%)	Frecuencia (Hz)	ζ (%)
1	0.259	1.8	0.259	1.9	0.261	1.7
2	0.573	1.1	0.559	1.8	0.565	1.2
3	0.777	1.6	0.769	1.5	0.778	1.4
4	1.209	1.1	1.217	1.1	1.203	0.4
5	1.298	0.3	1.302	0.4	1.324	1.3
6	1.520	1.0	1.545	0.4	1.518	0.6
7	1.880	1.1	1.864	1.2	1.879	0.8
8	2.452	0.9	2.465	0.2	2.494	0.4
9	3.446	0.2	3.429	0.2	3.499	0.8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.12 Compartiva de los resultados de frecuencias promedio en 2022 vs 2013

Modo	2013	2022	Diferencia	
	Frecuencia (Hz)	Frecuencia (Hz)	Frecuencia (Hz)	Porcentaje
1	0.29	0.260	-0.03	-10%
2	-	0.566	No aplica	
3	0.78	0.775	-0.005	-1%
4	1.22	1.210	-0.01	-1%
5	1.30	1.308	0.008	1%
6	1.56	1.528	-0.032	-2%
7	-	1.874	No aplica	
8	2.44	2.470	0.03	1%
9	-	3.458	No aplica	

Fuente: Elaboración propia y Gómez et al., 2014.

Conclusiones

En esta publicación se presenta el monitoreo periódico y evaluación del puente El Carrizo realizado en 2022, utilizando el sistema de instrumentación instalado en la sección doble voladizo y el análisis del comportamiento dinámico (modos, frecuencias naturales de vibración y amortiguamiento) de la sección atirantada.

Con la información registrada al finalizar los trabajos de mantenimiento en 2018, las sesiones de medición en 2021 y las tres sesiones de medición efectuadas en 2022, se observa que los resultados de la deformación por carga viva, los valores de referencia de los centroides y las deformaciones unitarias e inclinaciones en las dovelas instrumentadas de la sección doble voladizo del puente El Carrizo, se encuentran por debajo de los límites definidos de operación normal por carga viva.

Se complementó el estudio al obtener la tensión de los cables de la sección atirantada, con pesajes indirectos, a través de la estimación de los factores de calibración de los tirantes e implementación de un modelo matemático diseñado para calcular la tensión mediante el análisis de la respuesta dinámica del cable. A su vez, con la información de las tensiones de los cables se actualizó el modelo de elementos finitos de la estructura. Cabe mencionar que, los resultados de las tensiones en los tirantes por métodos indirectos es una primera aproximación de la carga real, que puede ser obtenida a través de métodos tradicionales como pesajes directos con gatos hidráulicos. Por lo que, para incrementar la confiabilidad de los resultados de las tensiones a través de pesajes dinámicos indirectos, se requiere realizar por única ocasión, el registro de las respuestas dinámicas en los tirantes y de manera simultánea, efectuar pesajes directos en algunos cables.

Con el análisis de los datos del sistema de monitoreo y del modelo matemático calibrado de la estructura, se concluye que, el puente El Carrizo continúa operando con los mismos rangos de seguridad que los encontrados en la última prueba de carga realizada en 2018 y que el comportamiento dinámico de la estructura es el esperado bajo condiciones de operación normal, garantizando la seguridad de los usuarios que transitan por la estructura.

Bibliografía

- Anaya, M., Quintana, J., Carrión, F., Martínez, L., Hernández, J., Gasca, H., Guzmán, G. y Hernández, A. (2020). *Monitoreo y evaluación de los parámetros estructurales del puente Mezcala*. [Publicación técnica No. 597]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt597.pdf>
- Anaya, M., Quintana, J., Carrión, F., Martínez, L., Hernández, J., Gasca, H., Valenzuela, I., Montes, M. y Hernández, A. (2018). *Calibración y ajuste de los parámetros estructurales del modelo matemático del puente Mezcala para su evaluación estructural*. [Publicación técnica No. 530]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt530.pdf>
- Brincker, R., Zhang, L. & Andersen, P. (2000). Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. In *IMAC 18: Proceedings of the International Modal Analysis Conference (IMAC), USA, February 7-10, 2000* (pp. 625-630).
- Carrión, F., López, J., Quintana, J. y Lozano, A. (2008). Nonlinear Assessment of Cable Vibration in a Stayed Bridge. *Experimental Mechanics*, 48(2), 153-161. <https://doi.org/10.1007/s11340-007-9077-1>
- Chen, D., Au, F., Thamb, L. & Lee, P. (2000). Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method. *Computers and Structures*, 74 (1), 1-9. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00315-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00315-0)
- Cheng, Y. (2013). *Monitoreo y evaluación estructural de puentes utilizando un sistema de instrumentación inalámbrico*. Programa de infraestructura del transporte. Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.
- Gómez, R., Arenas, L., Sánchez, R., Rosales, O., Escobar, J. y Mendoza, M. (2014). Instrumentación y monitoreo de cargas vivas en el puente atirantado El Carrizo. *Memorias del 19 Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. México, 12-15 de noviembre de 2014* (pp. 1-17).
- Irvine, M. (1992) *Cable Structures*. United States: Dover Publications Inc.

Madenci, E. & Guven, I. (2006). *The Finite Element and Applications in Engineering using ANSYS*. United States: Springer.

Martínez, L., Carrión, F., Quintana, J., Anaya, M., Hernández, A., Guzmán, G., Gasca, H., Hernández, J. y Machorro, J. (2022). *Seguimiento y análisis del puente El Carrizo mediante monitoreo periódico*. [Publicación técnica No. 668]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF].
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt668.pdf>

Martínez, L., Quintana, J., Arroyo, B., Carrión, F., Crespo, S., Hernández, J., Bonilla, V., Gasca, H. y Hernández, A. (2016). *Sistema Inteligente y protocolos de actuación para monitoreo de puentes*. [Publicación técnica No. 464]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF].
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt464.pdf>

Quintana, J., Carrión, F., Martínez, L., Hernández, J., Gasca, H., Anaya, M., Valenzuela, I., Guzmán, G. y Hernández, A. (2020). *Monitoreo y evaluación estructural en tipo real del puente Río Papaloapan*. [Publicación técnica No. 592]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF].
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt592.pdf>

Quintana, J., Carrión, F., Martínez, L., Hernández, J., Gasca, H., Anaya, M., Valenzuela, I., Guzmán, G. y Hernández, A. (2020). *Monitoreo y evaluación estructural en tiempo real del puente Mezcala*. [Publicación técnica No. 591]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF].
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt591.pdf>

Quintana, J., Carrión, F., Martínez, L., Anaya, M., Hernández, J., Gasca, H., Valenzuela, I. y Hernández, A. (2018). *Actualización y seguimiento de los índices de desempeño estructural del puente Río Papaloapan*. [Publicación técnica No. 524]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF].
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt524.pdf>

Quintana, J., Hernández, J., Martínez, L., Guzmán, G., Gasca, H., Anaya, M., Valenzuela, I., Carrión, F. y Martínez, M. (2018). *Pruebas de carga y monitoreo continuo durante la rehabilitación estructural del puente El Carrizo*. Reporte de actividades y resultados. México: Instituto Mexicano del Transporte.

Quintana, J., Hernández, J., Martínez, L., Machorro, J., Guzmán, G., Gasca, H., Anaya, M., Valenzuela, I., Montes, M., Hernández, A., Carrión, F. y Martínez, M. (2018). *Monitoreo estructural durante los trabajos de rehabilitación del puente El Carrizo*. Reporte final de actividades y resultados. México: Instituto Mexicano del Transporte.

Quintana, J., Hernández, J., Martínez, L., Machorro, J., Guzmán, G., Gasca, H., Anaya, M., Valenzuela, I., Montes, M., Hernández, A., Carrión, F. y Martínez, M. (2018). Monitoreo estructural durante los trabajos de rehabilitación del puente El Carrizo mes de septiembre. Reporte de actividades y resultados. México: Instituto Mexicano del Transporte.

Ramírez, J. (2021). *A seis años de su apertura, la autopista Mazatlán-Durango deja mucho que desear*. [Consulta en línea]. <https://www.elsoldemazatlan.com.mx/local/a-seis-anos-de-su-apertura-la-autopista-mazatlan-durango-deja-mucho-que-desear-4273098.html>

Sohn, H., Farrar, C., Hemez, F., Shunk, D., Stinemates, S., Nadler, B. & Czarnecki, J. (2004). *A review of structural health monitoring literature 1996-2001*. United States: Los Alamos National Laboratory.

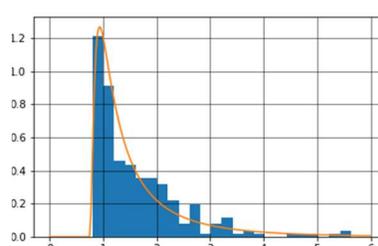
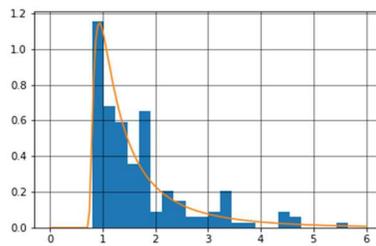
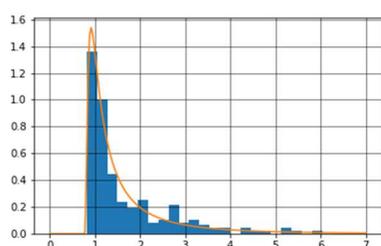
Anexo 1

Histogramas y ajustes de distribución de probabilidad tipo gauss inversa de las deformaciones unitarias a compresión por carga viva.

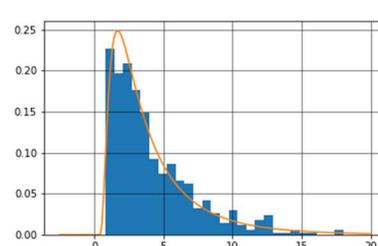
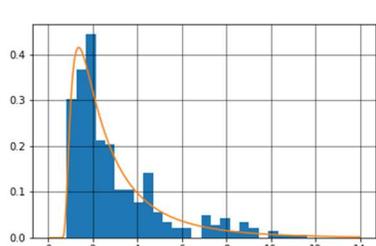
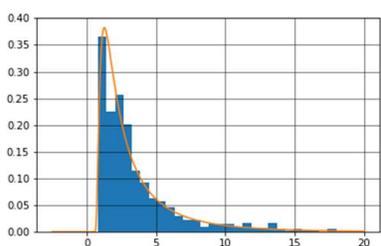
Sesión 1: 08-10/mar/2022

Sesión 2: 21-23/jun/2022
ESD4AD

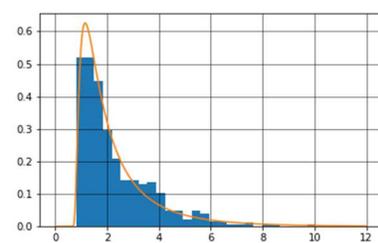
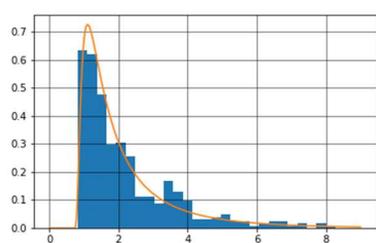
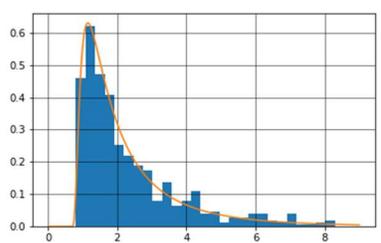
Sesión 3: 20-22/sep/2022



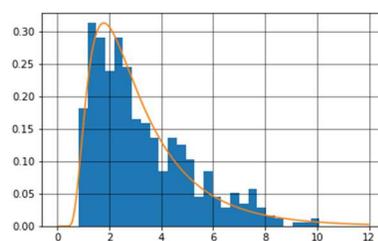
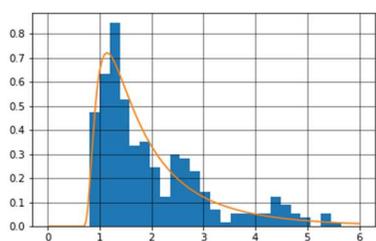
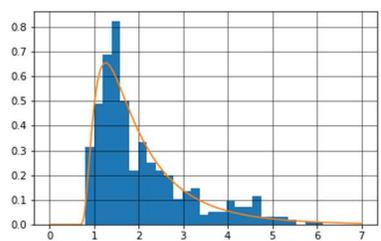
EID4AD



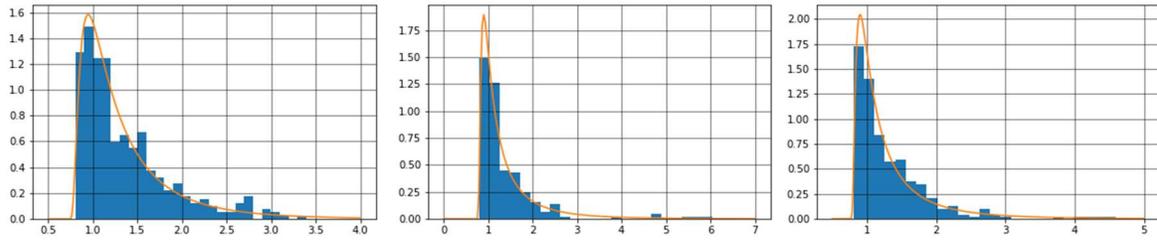
ESDIAD



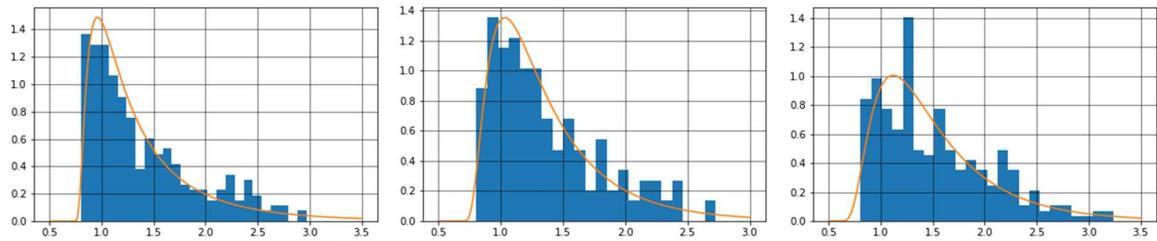
EIDIAD



ESDIAM



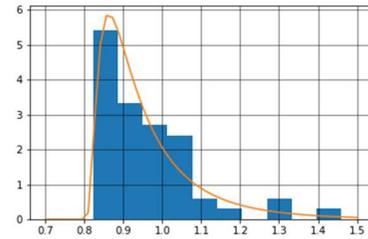
EIDIAM



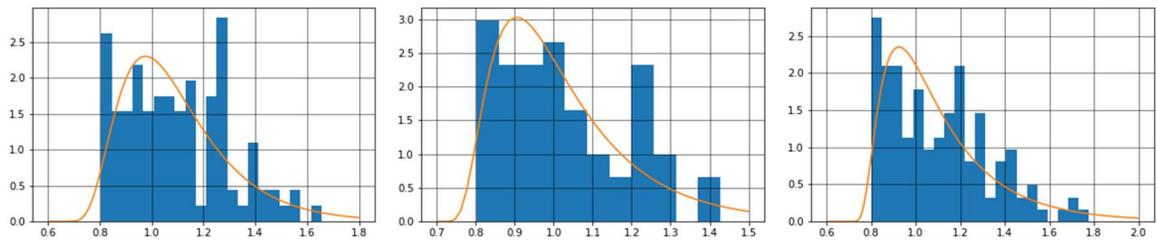
ESD4AM

Datos insuficientes para realizar el ajuste de distribución estadística

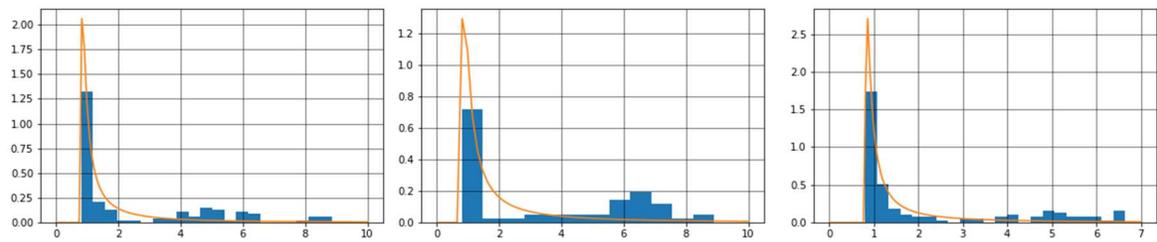
Datos insuficientes para realizar el ajuste de distribución estadística



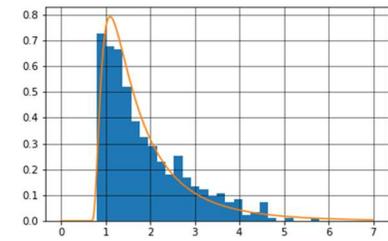
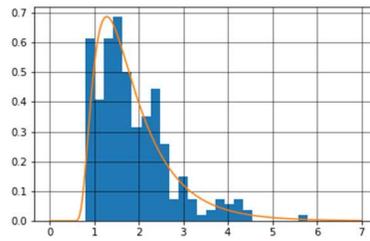
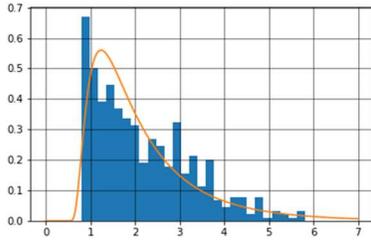
EID4AM



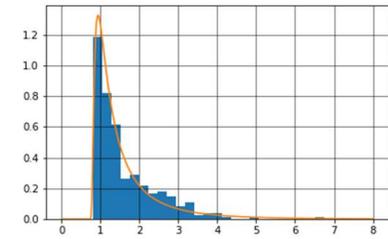
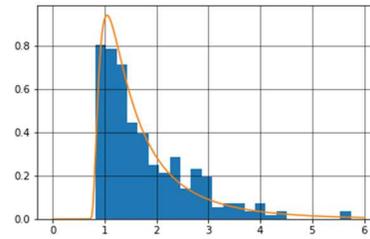
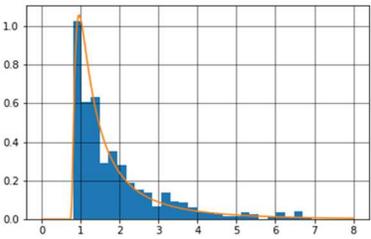
ESD4BD



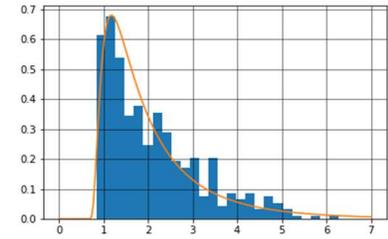
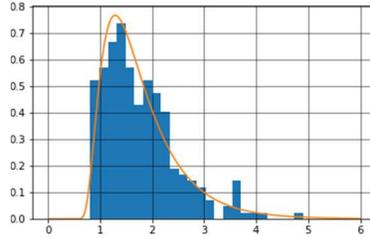
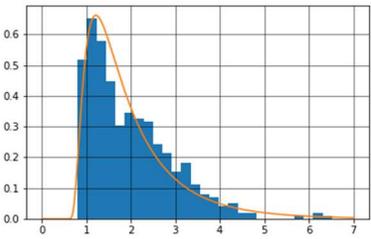
EID4BD



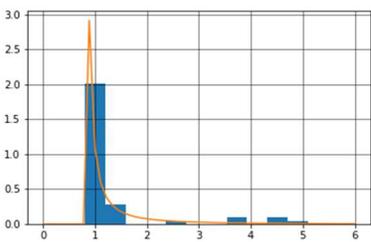
ESD1BD



EID1BD



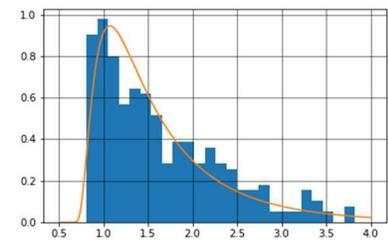
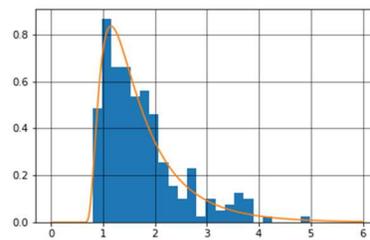
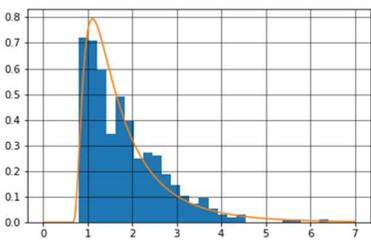
ESD1BM



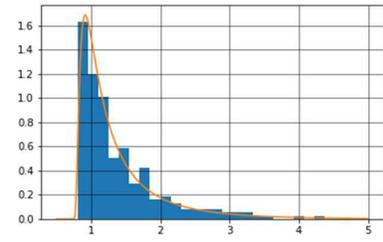
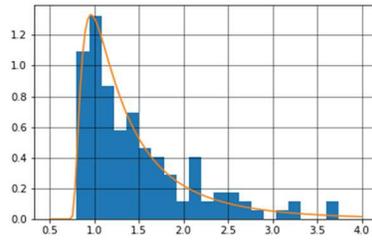
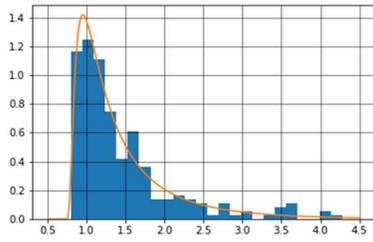
Datos insuficientes para realizar el ajuste de distribución estadística

Datos insuficientes para realizar el ajuste de distribución estadística

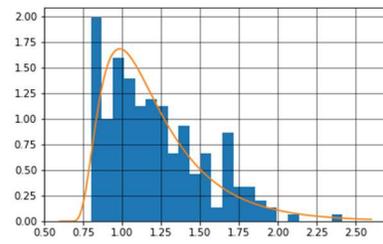
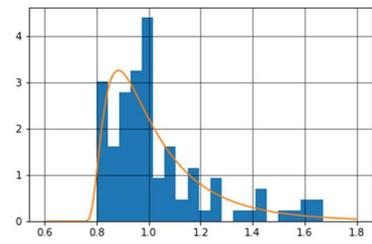
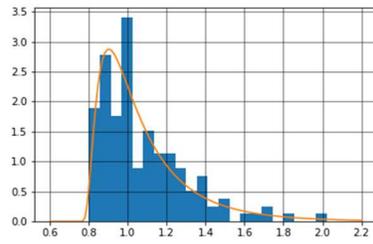
EID1BM



ESD4BM



EID4BM



Anexo 2

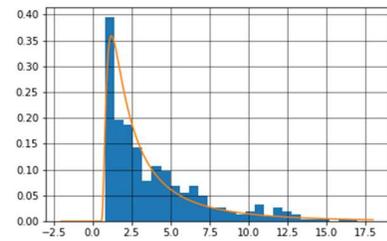
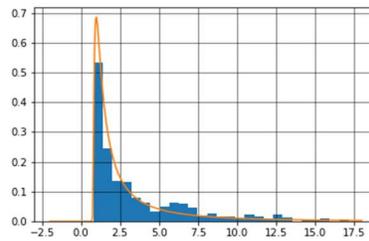
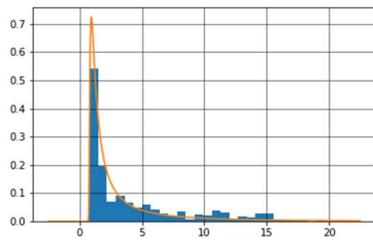
Histogramas y ajustes de distribución de probabilidad tipo gauss inversa de las deformaciones unitarias a tensión por carga viva.

Sesión 1: 08-10/mar/2022

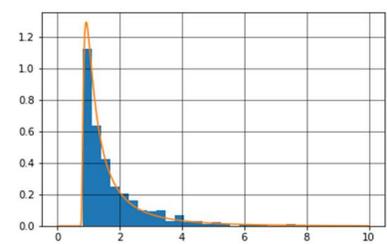
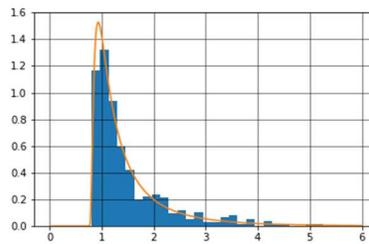
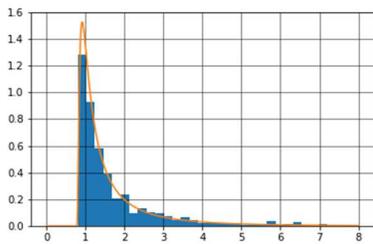
Sesión 2: 21-23/jun/2022

Sesión 3: 20-22/sep/2022

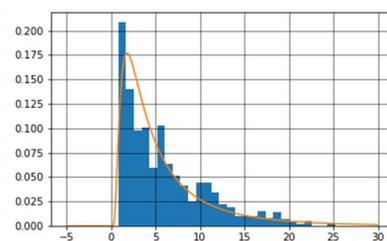
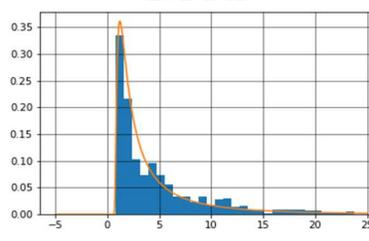
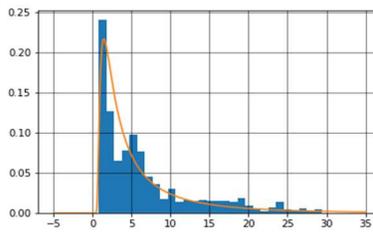
ESD4AD



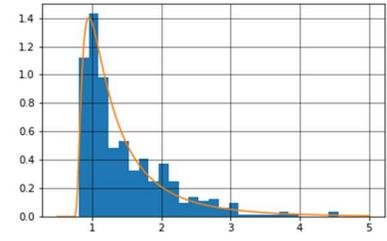
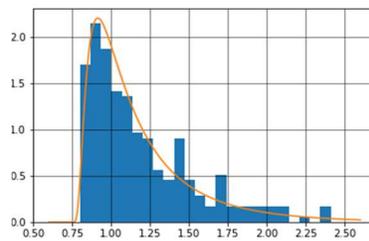
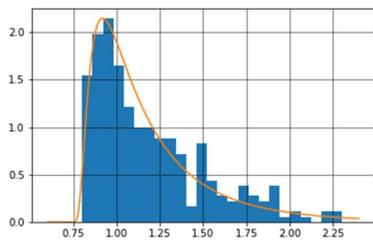
EID4AD



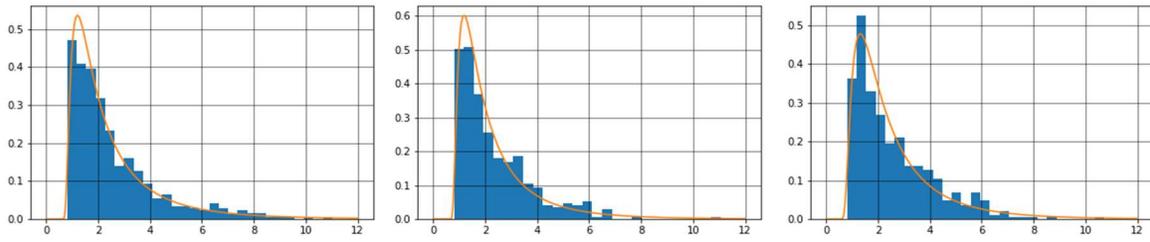
ESDIAD



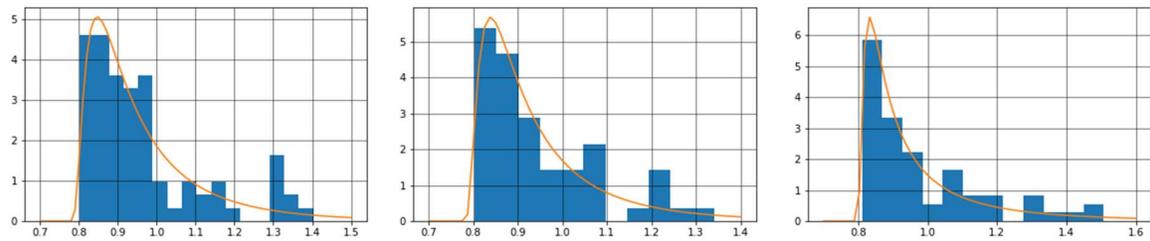
EIDIAD



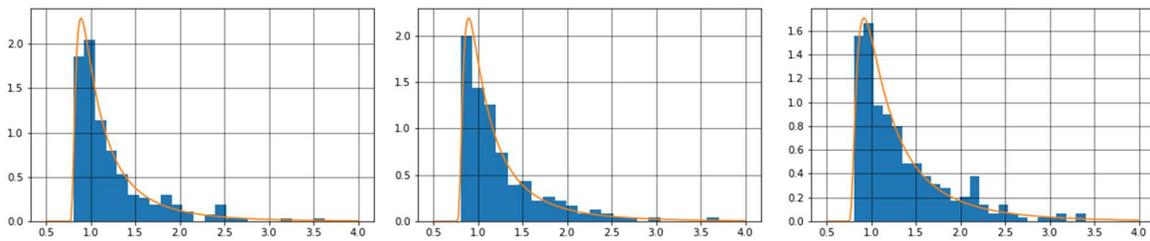
ESD1AM



EID1AM



ESD4AM



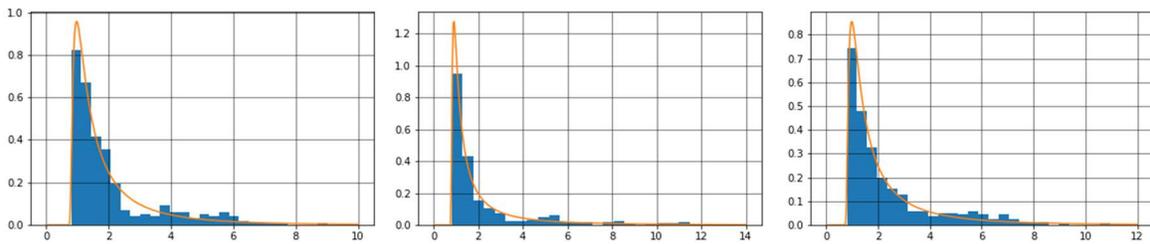
EID4AM

Datos insuficientes para
realizar el ajuste de
distribución estadística

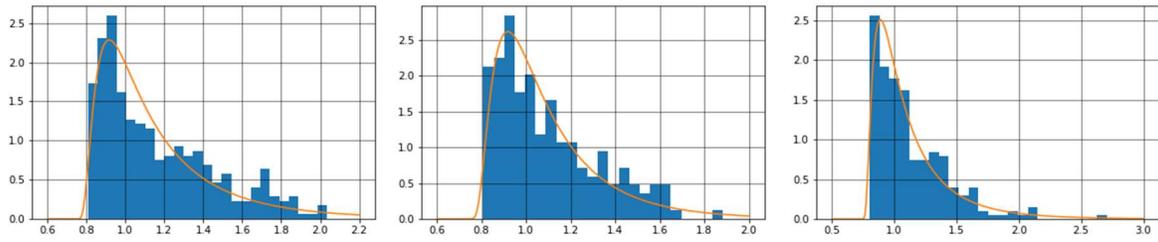
Datos insuficientes para
realizar el ajuste de
distribución estadística

Datos insuficientes para
realizar el ajuste de
distribución estadística

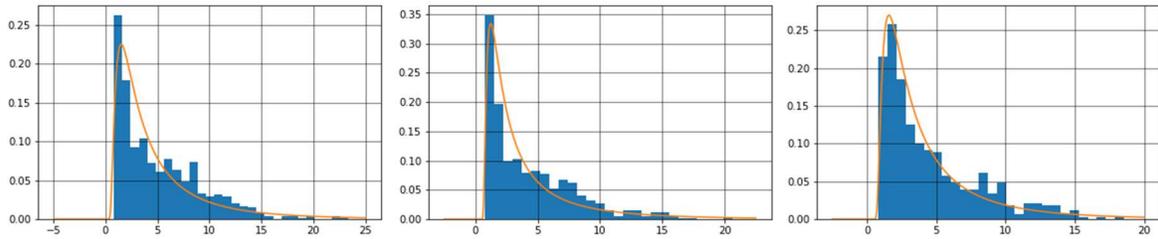
ESD4BD



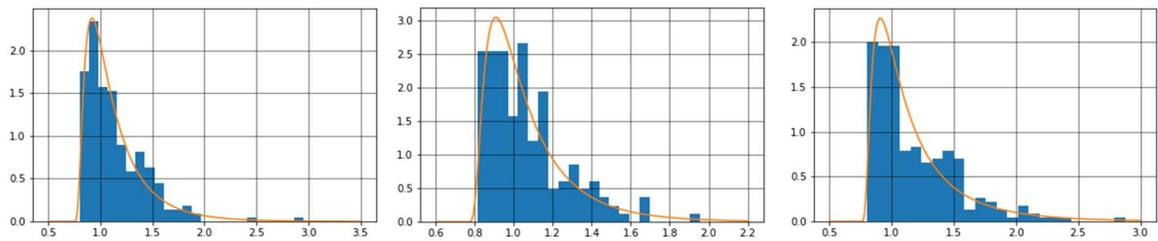
EID4BD



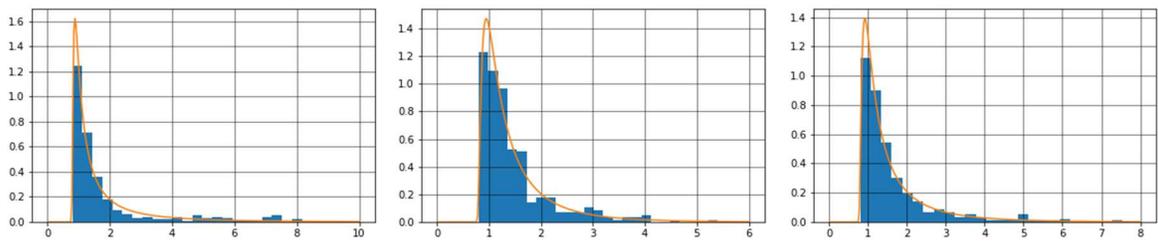
ESD1BD



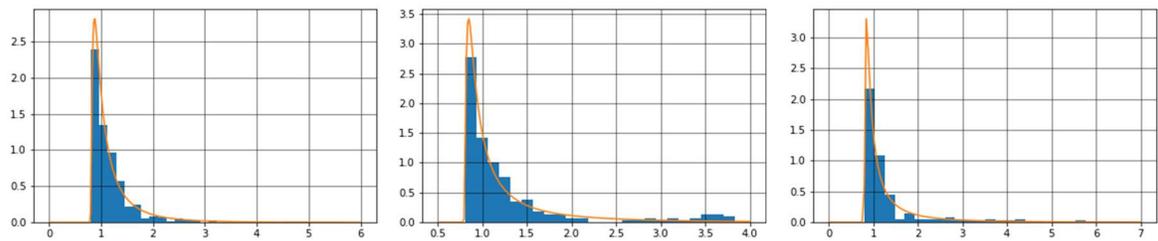
EID1BD



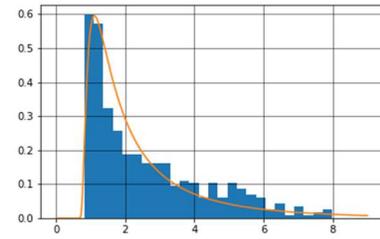
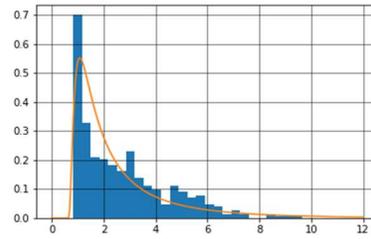
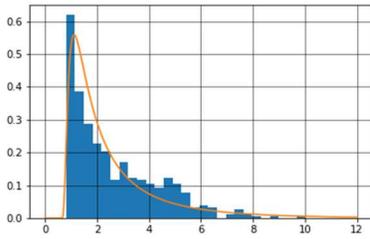
ESD1BM



EID1BM



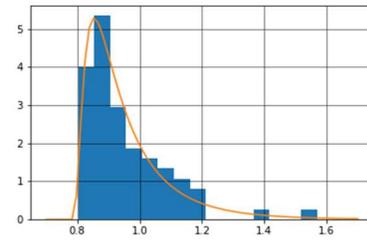
ESD4BM



EID4BM

Datos insuficientes para realizar el ajuste de distribución estadística

Datos insuficientes para realizar el ajuste de distribución estadística



Anexo 3

Se presentan los resultados de los registros de frecuencias fundamentales y armónicos identificados en las tres sesiones de medición efectuadas en 2022 en los tirantes del puente El Carrizo.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 1

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	Medición	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
f	2.359	2.270	2.344	2.339	2.334	2.392	1.747	1.751	1.768	2.338	2.347	2.373
f ₁	2.40	2.37	2.39	2.40	2.39	2.39	1.84	1.82	1.84	2.38	2.40	2.39
f ₂	4.59	4.47	4.62	4.71	4.82	4.95	3.51	3.46	3.45	4.48	4.76	4.80
f ₃	6.86	6.82	7.02	7.18	6.84	6.90	5.23	5.40	5.18	6.92	6.94	6.93
f ₄	9.83	9.11	9.64	9.25	9.65	9.68	6.96	6.85	7.06	9.21	9.34	9.62
f ₅	11.71	11.39	11.49	11.63	11.31	-	8.67	8.75	8.98	12.09	11.77	11.85
f ₆	-	13.52	-	13.94	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 2

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	Medición	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
f	2.499	2.409	2.493	2.388	2.434	2.417	2.335	2.330	2.345	2.418	2.345	2.417
f ₁	2.52	2.48	2.51	2.50	2.50	2.51	2.43	2.40	2.43	2.45	2.42	2.46
f ₂	5.00	4.90	5.02	4.86	4.86	4.90	4.71	4.72	4.69	4.77	4.74	4.79
f ₃	7.44	7.22	7.12	7.28	7.30	7.44	6.99	6.86	6.95	7.29	7.18	6.94
f ₄	9.91	9.83	10.27	9.41	9.95	9.51	9.22	9.43	-	-	9.11	9.98
f ₅	12.72	11.72	-	11.82	11.90	11.90	-	11.31	-	-	-	-
f ₆	14.90	14.45	-	14.28	-	-	-	14.21	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 3

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	Medición	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
f	1.974	1.941	1.982	2.034	2.033	2.018	2.036	2.004	2.021	2.039	1.993	2.010
f ₁	1.99	1.99	2.00	2.11	2.11	2.10	2.08	2.07	2.08	2.03	2.04	2.04
f ₂	3.99	3.93	3.91	4.16	4.12	4.12	4.11	4.12	4.10	4.16	4.12	4.17
f ₃	6.01	5.78	6.03	6.17	6.01	6.09	6.06	6.05	6.03	6.16	6.17	6.13
f ₄	7.89	7.68	7.76	8.38	8.27	7.94	8.11	8.14	8.17	8.13	7.89	8.13
f ₅	9.98	9.72	10.04	9.97	10.00	10.02	-	9.94	9.95	10.12	10.11	9.98
f ₆	11.60	-	-	12.16	-	-	-	11.77	-	-	11.53	11.76
f ₇	-	-	-	14.00	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 4

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	Medición	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
f	1.979	-	1.937	1.712	-	1.722	1.864	-	1.910	1.934	-	1.917
f ₁	1.98	-	1.98	1.78	-	1.76	1.95	-	1.95	1.96	-	1.96
f ₂	3.89	-	3.86	3.46	-	3.48	3.82	-	3.83	3.83	-	3.85
f ₃	5.93	-	5.94	5.16	-	5.02	5.59	-	5.88	5.82	-	5.79
f ₄	7.92	-	7.92	7.12	-	6.93	7.38	-	7.44	7.73	-	7.57
f ₅	9.88	-	9.87	8.46	-	8.85	9.36	-	-	-	-	-
f ₆	11.90	-	11.46	10.07	-	10.12	11.05	-	-	-	-	-
f ₇	13.87	-	13.22	11.89	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 5

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	Medición	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
f	1.646	1.624	1.637	1.390	1.394	1.409	1.412	1.403	1.401	1.566	1.548	1.564
f ₁	1.68	1.68	1.67	1.42	1.41	1.42	1.44	1.43	1.43	1.60	1.61	1.61
f ₂	3.31	3.31	3.32	2.72	2.78	2.72	2.83	2.85	2.83	3.17	3.16	3.16
f ₃	4.96	4.91	4.87	4.34	4.23	4.23	4.27	4.12	4.23	4.71	4.75	4.75
f ₄	6.56	6.59	6.57	5.51	5.54	5.50	5.61	5.64	5.56	6.27	6.23	6.30
f ₅	8.39	8.03	8.17	7.17	6.95	7.26	7.04	7.01	7.01	7.89	7.59	7.88
f ₆	9.94	9.59	9.59	8.25	-	-	8.45	8.50	8.36	9.46	9.16	9.48
f ₇	11.49	11.38	11.47	9.70	-	-	-	9.80	-	11.04	10.84	10.79
f ₈	13.26	-	13.29	10.92	-	-	-	11.17	-	12.24	12.39	12.36
f ₉	14.55	-	-	-	-	-	-	-	-	14.08	-	14.04

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 6

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	Medición	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
f	1.483	1.480	1.486	1.290	1.299	1.284	1.322	1.321	1.305	1.483	1.488	1.498
f ₁	1.52	1.52	1.52	1.32	1.32	1.30	1.32	1.33	1.30	1.53	1.54	1.54
f ₂	3.02	3.01	3.02	2.62	2.62	2.62	2.67	2.68	2.67	3.04	3.03	3.04
f ₃	4.46	4.44	4.41	3.91	3.92	3.92	4.00	3.99	3.99	4.53	4.53	4.53
f ₄	6.02	5.99	6.00	5.18	5.16	5.19	5.29	5.26	5.27	6.01	6.12	5.93
f ₅	7.43	7.44	7.45	6.51	6.51	6.42	6.60	6.61	6.59	7.54	7.52	7.60
f ₆	8.82	8.82	8.86	7.64	7.84	7.55	7.88	7.84	7.58	8.84	8.84	8.77
f ₇	10.25	10.22	10.37	8.98	9.20	8.93	-	9.31	-	10.16	10.11	10.48
f ₈	11.86	-	11.85	10.17	10.37	-	-	10.55	-	11.75	-	11.91
f ₉	-	-	-	11.71	11.53	-	-	-	-	-	-	13.60

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 7

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	Medición	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
f	1.089	1.094	1.103	1.404	1.418	1.411	1.337	1.340	1.341	1.055	1.056	1.069
f ₁	1.12	1.12	1.12	1.44	1.43	1.41	1.35	1.36	1.36	1.07	1.08	1.08
f ₂	2.21	2.22	2.22	2.85	2.85	2.86	2.71	2.72	2.71	2.13	2.14	2.13
f ₃	3.31	3.31	3.32	4.25	4.26	4.26	4.04	4.07	4.03	3.19	3.19	3.19
f ₄	4.39	4.39	4.43	5.68	5.68	5.66	5.38	5.38	5.40	4.23	4.24	4.23
f ₅	5.39	5.47	5.46	7.02	7.02	7.06	6.63	6.71	6.70	5.24	5.28	5.27
f ₆	6.61	6.58	6.67	8.38	8.51	8.61	7.97	8.04	8.00	6.32	6.29	6.34
f ₇	7.58	7.62	7.66	9.89	9.94	9.83	-	9.21	9.24	7.37	7.40	7.42
f ₈	8.75	8.70	-	11.27	11.33	11.30	-	10.71	10.70	8.42	8.39	8.51
f ₉	9.69	9.94	-	12.66	-	12.49	-	12.10	12.01	-	9.50	9.59
f ₁₀	10.83	10.85	-	13.80	-	-	-	-	13.60	-	-	10.66

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 8

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	Medición	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
f	0.992	0.991	0.998	1.076	1.088	1.087	1.125	1.121	1.132	1.107	1.103	1.112
f ₁	1.01	1.00	1.02	1.10	1.11	1.10	1.14	1.15	1.14	1.13	1.13	1.13
f ₂	2.00	1.99	2.00	2.18	2.19	2.19	2.28	2.27	2.28	2.23	2.24	2.24
f ₃	2.98	2.99	3.01	3.26	3.29	3.30	3.40	3.39	3.41	3.34	3.35	3.35
f ₄	3.98	3.98	3.99	4.35	4.37	4.35	4.53	4.52	4.53	4.47	4.46	4.45
f ₅	4.95	4.96	5.00	5.43	5.40	5.40	5.64	5.62	5.63	5.54	5.55	5.54
f ₆	5.91	5.93	6.00	6.44	6.53	6.52	6.78	6.76	6.78	6.66	6.63	6.60
f ₇	-	6.94	6.90	7.57	7.61	7.63	7.83	7.81	7.85	7.73	7.71	7.75
f ₈	-	7.89	8.00	8.63	8.71	8.62	8.88	8.86	8.99	8.76	8.86	8.86
f ₉	-	8.90	9.00	9.64	9.75	9.71	-	10.09	10.22	10.05	9.79	9.98
f ₁₀	-	9.96	10.00	10.77	-	10.94	-	-	11.40	10.98	10.97	11.21

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 9

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	Medición	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
f	0.922	0.919	0.920	0.837	0.843	0.843	0.839	0.836	0.839	0.827	0.828	0.830
f ₁	0.94	0.94	0.94	0.86	0.87	0.87	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85	0.85
f ₂	1.86	1.85	1.86	1.69	1.70	1.69	1.69	1.69	1.69	1.67	1.68	1.68
f ₃	2.78	2.79	2.72	2.51	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.50	2.51	2.52
f ₄	3.70	3.69	3.72	3.36	3.38	3.37	3.37	3.38	3.37	3.34	3.34	3.34
f ₅	4.60	4.61	4.56	4.18	4.20	4.21	4.21	4.21	4.22	4.17	4.11	4.17
f ₆	5.51	5.51	5.47	4.99	5.05	5.03	5.04	5.03	5.07	4.97	4.99	5.01
f ₇	6.41	6.45	6.43	5.87	5.92	5.88	5.87	5.84	5.86	5.84	5.81	5.83
f ₈	7.39	7.38	7.44	6.68	6.73	6.72	6.65	6.64	6.53	6.63	6.56	6.60
f ₉	-	8.15	-	7.51	7.58	7.63	7.52	7.56	7.57	7.38	7.41	7.40
f ₁₀	-	-	-	8.36	8.39	-	-	8.34	8.42	8.26	8.26	8.25

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 10

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	Medición	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
f	0.826	0.831	0.840	0.839	0.844	0.840	0.802	0.801	0.800	0.837	0.837	0.833
f ₁	0.86	0.85	0.87	0.86	0.86	0.86	0.82	0.82	0.81	0.86	0.86	0.86
f ₂	1.67	1.68	1.67	1.69	1.68	1.69	1.61	1.61	1.61	1.69	1.69	1.70
f ₃	2.50	2.50	2.51	2.53	2.55	2.54	2.41	2.43	2.41	2.52	2.56	2.53
f ₄	3.33	3.37	3.37	3.36	3.39	3.37	3.21	3.22	3.22	3.40	3.36	3.37
f ₅	4.12	4.13	4.14	4.18	4.18	4.21	4.00	4.01	4.01	4.21	4.18	4.19
f ₆	4.88	4.98	4.96	5.00	5.04	5.06	4.74	4.80	4.80	5.05	5.02	4.99
f ₇	-	5.80	6.07	5.85	5.91	5.82	5.67	5.60	5.58	5.95	5.83	5.69
f ₈	-	6.63	6.69	6.71	6.66	6.63	6.41	6.39	6.41	6.68	6.65	6.67
f ₉	-	7.49	7.50	7.59	7.74	7.61	7.22	7.21	7.18	7.47	7.51	-
f ₁₀	-	8.30	-	8.39	-	-	-	8.02	7.97	8.34	8.38	-

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 11

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	Medición	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
f	0.941	-	0.958	0.959	-	0.962	0.998	-	0.997	0.963	-	0.969
f ₁	0.96	-	0.96	0.96	-	0.98	1.01	-	1.00	0.98	-	0.98
f ₂	1.90	-	1.90	1.94	-	1.94	2.01	-	2.01	1.95	-	1.95
f ₃	2.83	-	2.84	2.91	-	2.90	3.01	-	3.03	2.83	-	2.94
f ₄	3.77	-	3.78	3.86	-	3.86	4.01	-	4.00	3.89	-	3.90
f ₅	4.70	-	4.96	4.81	-	4.80	5.00	-	4.99	4.82	-	4.82
f ₆	5.61	-	5.60	5.75	-	5.74	5.98	-	5.99	5.77	-	5.79
f ₇	6.57	-	6.56	6.72	-	6.72	6.95	-	6.98	6.68	-	6.54
f ₈	7.52	-	7.89	7.57	-	7.68	7.95	-	7.97	7.63	-	7.74
f ₉	-	-	-	8.64	-	-	8.98	-	9.03	8.64	-	8.96
f ₁₀	-	-	-	-	-	-	-	-	10.04	9.71	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 12

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	Medición	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
f	0.866	0.871	0.874	0.854	0.853	0.851	0.885	0.879	0.883	0.867	0.870	0.866
f ₁	0.88	0.88	0.88	0.87	0.87	0.87	0.90	0.90	0.90	0.88	0.88	0.88
f ₂	1.76	1.76	1.76	1.73	1.73	1.73	1.78	1.79	1.78	1.75	1.76	1.75
f ₃	2.62	2.63	2.63	2.60	2.59	2.58	2.67	2.65	2.69	2.63	2.64	2.62
f ₄	3.50	3.49	3.49	3.44	3.44	3.45	3.54	3.55	3.54	3.49	3.49	3.49
f ₅	4.36	4.37	4.34	4.32	4.23	4.29	4.45	4.43	4.41	4.34	4.34	4.34
f ₆	5.15	5.17	5.23	5.12	5.12	5.11	5.31	5.31	5.20	5.23	5.23	5.23
f ₇	5.97	6.06	6.05	5.98	5.96	5.98	6.17	6.15	6.18	6.10	6.09	6.08
f ₈	6.93	6.93	6.95	6.82	6.80	6.79	7.05	7.06	7.04	6.91	6.91	6.89
f ₉	-	7.88	7.85	7.69	-	7.64	7.94	7.92	7.97	7.71	7.76	7.59
f ₁₀	-	8.72	8.79	8.58	-	8.54	-	8.75	8.77	8.69	8.70	8.67

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 13

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
f	0.815	0.814	0.812	0.767	0.762	0.766	0.742	0.743	0.744	0.823	0.825	0.823
f ₁	0.83	0.83	0.83	0.78	0.78	0.78	0.76	0.76	0.76	0.83	0.83	0.83
f ₂	1.64	1.64	1.64	1.55	1.54	1.55	1.50	1.50	1.50	1.66	1.66	1.66
f ₃	2.46	2.46	2.47	2.32	2.30	2.31	2.25	2.24	2.25	2.47	2.48	2.47
f ₄	3.29	3.28	3.28	3.07	3.06	3.08	2.99	2.99	3.00	3.30	3.29	3.29
f ₅	4.10	4.09	4.08	3.84	3.82	3.82	3.74	3.70	3.72	4.12	4.13	4.12
f ₆	4.96	4.84	4.95	4.60	4.59	4.59	4.48	4.45	4.44	4.92	4.94	4.93
f ₇	5.66	5.69	5.49	5.38	5.34	5.34	5.22	5.22	5.29	5.76	5.75	5.72
f ₈	6.49	6.46	6.54	6.12	6.00	6.20	5.94	5.96	5.99	6.58	6.55	6.57
f ₉	7.31	7.33	7.33	6.84	6.82	6.79	6.70	6.71	6.61	7.40	7.53	7.41
f ₁₀	8.12	8.13	8.10	7.67	7.64	7.60	7.43	7.39	7.36	8.15	8.27	8.11

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia fundamental y armónicos identificados en los tirantes 14

Semi-arpa	1 - (Cuerpo A Durango)			2- (Cuerpo A Mazatlán)			3 - (Cuerpo B Mazatlán)			4 - (Cuerpo B Durango)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
f	0.785	0.779	0.785	0.840	0.837	0.826	0.822	0.821	0.826	0.776	0.776	0.776
f ₁	0.80	0.79	0.79	0.85	0.84	0.85	0.84	0.83	0.83	0.78	0.79	0.79
f ₂	1.58	1.58	1.58	1.69	1.68	1.68	1.66	1.66	1.65	1.56	1.56	1.56
f ₃	2.37	2.36	2.36	2.47	2.52	2.50	2.46	2.48	2.48	2.34	2.33	2.33
f ₄	3.12	3.16	3.15	3.42	3.36	3.30	3.34	3.30	3.32	3.12	3.11	3.12
f ₅	3.94	3.93	3.91	4.22	4.18	4.14	4.14	4.03	4.12	3.90	3.90	3.88
f ₆	4.74	4.71	4.49	5.03	5.00	5.01	4.94	4.95	4.96	4.67	4.67	4.55
f ₇	5.44	5.44	5.49	5.82	-	5.61	5.73	5.74	5.71	5.38	5.38	5.36
f ₈	-	6.24	6.50	6.67	-	6.59	6.51	6.57	6.61	6.16	6.17	6.19
f ₉	-	6.91	-	7.56	-	7.46	7.40	7.39	7.42	6.97	6.97	6.95
f ₁₀	-	7.75	-	8.45	-	8.29	8.22	8.20	8.24	7.74	7.74	7.78

Fuente: Elaboración propia.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
San Fandila, Pedro Escobedo
C.P. 76703
Querétaro, México
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>