



MONITOREO Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL EN TIEMPO REAL DEL PUENTE MEZCALA

Juan Antonio Quintana Rodríguez
Francisco Javier Carrión Viramontes
Luis Álvaro Martínez Trujano
Jorge Alberto Hernández Figueroa
Héctor Miguel Gasca Zamora
Miguel Anaya Díaz
Jesús Iván Valenzuela Delgado
Germán Michel Guzmán Acevedo
Andrés Hernández Guzmán

**Publicación Técnica No. 591
Sanfandila, Qro, 2020**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Monitoreo y evaluación estructural en tiempo real
del puente Mezcala**

Publicación Técnica No. 591
Sanfandila, Qro, 2020

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, el Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, el M. C. Álvaro Martínez Trujano, el Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, el Lic. Héctor Miguel Gasca Zamora, el M. C. Miguel Anaya Díaz, el M. C. Jesús Iván Valenzuela Delgado y el Ing. Andrés Hernández Guzmán

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 04/18 “Monitoreo y evaluación estructural en tiempo real del puente Mezcala”.

Se agradece la colaboración de Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por la revisión y las facilidades para la realización del presente trabajo.

Contenido

Índice de figuras	v
Índice de tablas	xi
Sinopsis.....	xiii
Abstract	xv
Resumen ejecutivo	xvii
1 Introducción	1
2 Sistema de monitoreo puente Mezcala.....	5
3 Seguimiento de los parámetros estructurales del puente Mezcala	9
4 Conclusiones	91
5 Bibliografía	93

Índice de figuras

Figura 1.1 Puente Mezcala.....	3
Figura 1.2 Ubicación geográfica del puente Mezcala.....	4
Figura 2.1 Instrumentación del puente Mezcala.....	6
Figura 3.1 Valores de deformación del extensómetro A-EA-5.....	10
Figura 3.2 Valores de deformación del extensómetro A-EA-6.....	10
Figura 3.3 Valores de deformación del extensómetro A-EA-7.....	10
Figura 3.4 Valores de deformación del extensómetro A-EA-8.....	11
Figura 3.5 Valores de deformación del extensómetro A-EA-9.....	11
Figura 3.6 Valores de deformación del extensómetro A-EA-10.....	12
Figura 3.7 Valores de deformación del extensómetro A-EA-11.....	12
Figura 3.8 Valores de deformación del extensómetro A-EA-12.....	13
Figura 3.9 Valores de deformación del extensómetro A-EA-13.....	13
Figura 3.10 Valores de deformación del extensómetro A-EA-14.....	14
Figura 3.11 Valores de deformación del extensómetro A-EA-15.....	14
Figura 3.12 Valores de deformación del extensómetro A-EA-16.....	15
Figura 3.13 Valores de deformación del extensómetro A-EA-17.....	15
Figura 3.14 Valores de deformación del extensómetro A-EA-18.....	16
Figura 3.15 Valores de deformación del extensómetro A-EA-19.....	16
Figura 3.16 Valores de deformación del extensómetro A-EA-20.....	17
Figura 3.17 Valores de deformación del extensómetro A-EA-21.....	17
Figura 3.18 Valores de deformación del extensómetro A-EA-22.....	18
Figura 3.19 Valores de deformación del extensómetro A-EA-23.....	18
Figura 3.20 Valores de deformación del extensómetro A-EA-24.....	19
Figura 3.21 Valores de deformación del extensómetro B-EA-5.....	19
Figura 3.22 Valores de deformación del extensómetro B-EA-6.....	20
Figura 3.23 Valores de deformación del extensómetro B-EA-7.....	20
Figura 3.24 Valores de deformación del extensómetro B-EA-8.....	21

Figura 3.25 Valores de deformación del extensómetro B-EA-9.....	21
Figura 3.26 Valores de deformación del extensómetro B-EA-10.....	22
Figura 3.27 Valores de deformación del extensómetro B-EA-11.....	22
Figura 3.28 Valores de deformación del extensómetro B-EA-12.....	23
Figura 3.29 Valores de deformación del extensómetro B-EA-13.....	23
Figura 3.30 Valores de deformación del extensómetro B-EA-14.....	24
Figura 3.31 Valores de deformación del extensómetro B-EA-15.....	24
Figura 3.32 Valores de deformación del extensómetro B-EA-16.....	25
Figura 3.33 Valores de deformación del extensómetro B-EA-17.....	25
Figura 3.34 Valores de deformación del extensómetro B-EA-18.....	26
Figura 3.35 Valores de deformación del extensómetro B-EA-19.....	26
Figura 3.36 Valores de deformación del extensómetro B-EA-20.....	27
Figura 3.37 Valores de deformación del extensómetro B-EA-21.....	27
Figura 3.38 Valores de deformación del extensómetro B-EA-22.....	28
Figura 3.39 Valores de deformación del extensómetro B-EA-23.....	28
Figura 3.40 Valores de deformación del extensómetro B-EA-24.....	29
Figura 3.41 Valores de inclinación del inclinómetro A-T2-I-L	30
Figura 3.42 Valores de inclinación del inclinómetro A-T2-I-T	31
Figura 3.43 Valores de inclinación del inclinómetro B-T2-I-L	31
Figura 3.44 Valores de inclinación del inclinómetro B-T2-I-T	32
Figura 3.45 Valores de inclinación del inclinómetro B-T3-I-L	32
Figura 3.46 Valores de inclinación del inclinómetro B-T3-I-T	33
Figura 3.47 Tensión del tirante 7 de la semi arpa 1	34
Figura 3.48 Tensión del tirante 3 de la semi arpa 1	34
Figura 3.49 Tensión del tirante 3 de la semi arpa 2	35
Figura 3.50 Tensión del tirante 7 de la semi arpa 2	35
Figura 3.51 Tensión del tirante 8 de la semi arpa 5	36
Figura 3.52 Tensión del tirante 3 de la semi arpa 5	36
Figura 3.53 Tensión del tirante 8 de la semi arpa 6	37
Figura 3.54 Tensión del tirante 3 de la semi arpa 7	37
Figura 3.55 Tensión del tirante 3 de la semi arpa 8	38
Figura 3.56 Tensión del tirante 8 de la semi arpa 8	38

Figura 3.57 Tensión del tirante 11 de la semi arpa 9	39
Figura 3.58 Tensión del tirante 4 de la semi arpa 9	39
Figura 3.59 Tensión del tirante 7 de la semi arpa 11	40
Figura 3.60 Media estadística del extensómetro A-EA-5 a tensión	41
Figura 3.61 Media estadística del extensómetro A-EA-6 a tensión	41
Figura 3.62 Media estadística del extensómetro A-EA-7 a tensión	42
Figura 3.63 Media estadística del extensómetro A-EA-8 a tensión	42
Figura 3.64 Media estadística del extensómetro A-EA-9 a tensión	43
Figura 3.65 Media estadística del extensómetro A-EA-10 a tensión	43
Figura 3.66 Media estadística del extensómetro A-EA-11 a tensión	44
Figura 3.67 Media estadística del extensómetro A-EA-12 a tensión	44
Figura 3.68 Media estadística del extensómetro A-EA-13 a tensión	45
Figura 3.69 Media estadística del extensómetro A-EA-14 a tensión	45
Figura 3.70 Media estadística del extensómetro A-EA-15 a tensión	46
Figura 3.71 Media estadística del extensómetro A-EA-16 a tensión	46
Figura 3.72 Media estadística del extensómetro A-EA-17 a tensión	47
Figura 3.73 Media estadística del extensómetro A-EA-18 a tensión	47
Figura 3.74 Media estadística del extensómetro A-EA-19 a tensión	48
Figura 3.75 Media estadística del extensómetro A-EA-20 a tensión	48
Figura 3.76 Media estadística del extensómetro A-EA-21 a tensión	49
Figura 3.77 Media estadística del extensómetro A-EA-22 a tensión	49
Figura 3.78 Media estadística del extensómetro A-EA-23 a tensión	50
Figura 3.79 Media estadística del extensómetro A-EA-24 a tensión	50
Figura 3.80 Media estadística del extensómetro B-EA-5 a tensión	51
Figura 3.81 Media estadística del extensómetro B-EA-6 a tensión	51
Figura 3.82 Media estadística del extensómetro B-EA-7 a tensión	52
Figura 3.83 Media estadística del extensómetro B-EA-8 a tensión	52
Figura 3.84 Media estadística del extensómetro B-EA-9 a tensión	53
Figura 3.85 Media estadística del extensómetro B-EA-10 a tensión	53
Figura 3.86 Media estadística del extensómetro B-EA-11 a tensión	54
Figura 3.87 Media estadística del extensómetro B-EA-12 a tensión	54
Figura 3.88 Media estadística del extensómetro B-EA-13 a tensión	55

Figura 3.89 Media estadística del extensómetro B-EA-14 a tensión	55
Figura 3.90 Media estadística del extensómetro B-EA-15 a tensión	56
Figura 3.91 Media estadística del extensómetro B-EA-16 a tensión	56
Figura 3.92 Media estadística del extensómetro B-EA-17 a tensión	57
Figura 3.93 Media estadística del extensómetro B-EA-18 a tensión	57
Figura 3.94 Media estadística del extensómetro B-EA-19 a tensión	58
Figura 3.95 Media estadística del extensómetro B-EA-20 a tensión	58
Figura 3.96 Media estadística del extensómetro B-EA-21 a tensión	59
Figura 3.97 Media estadística del extensómetro B-EA-22 a tensión	59
Figura 3.98 Media estadística del extensómetro B-EA-23 a tensión	60
Figura 3.99 Media estadística del extensómetro B-EA-24 a tensión	60
Figura 3.100 Media estadística del extensómetro A-EA-5 a compresión	61
Figura 3.101 Media estadística del extensómetro A-EA-6 a compresión	61
Figura 3.102 Media estadística del extensómetro A-EA-7 a compresión	62
Figura 3.103 Media estadística del extensómetro A-EA-8 a compresión	62
Figura 3.104 Media estadística del extensómetro A-EA-9 a compresión	63
Figura 3.105 Media estadística del extensómetro A-EA-10 a compresión	63
Figura 3.106 Media estadística del extensómetro A-EA-11 a compresión	64
Figura 3.107 Media estadística del extensómetro A-EA-12 a compresión	64
Figura 3.108 Media estadística del extensómetro A-EA-13 a compresión	65
Figura 3.109 Media estadística del extensómetro A-EA-14 a compresión	65
Figura 3.110 Media estadística del extensómetro A-EA-15 a compresión	66
Figura 3.111 Media estadística del extensómetro A-EA-16 a compresión	66
Figura 3.112 Media estadística del extensómetro A-EA-17 a compresión	67
Figura 3.113 Media estadística del extensómetro A-EA-18 a compresión	67
Figura 3.114 Media estadística del extensómetro A-EA-19 a compresión	68
Figura 3.115 Media estadística del extensómetro A-EA-20 a compresión	68
Figura 3.116 Media estadística del extensómetro A-EA-21 a compresión	69
Figura 3.117 Media estadística del extensómetro A-EA-22 a compresión	69
Figura 3.118 Media estadística del extensómetro A-EA-23 a compresión	70
Figura 3.119 Media estadística del extensómetro A-EA-24 a compresión	70
Figura 3.120 Media estadística del extensómetro B-EA-5 a compresión	71

Figura 3.121 Media estadística del extensómetro B-EA-6 a compresión	71
Figura 3.122 Media estadística del extensómetro B-EA-7 a compresión	72
Figura 3.123 Media estadística del extensómetro B-EA-8 a compresión	72
Figura 3.124 Media estadística del extensómetro B-EA-9 a compresión	73
Figura 3.125 Media estadística del extensómetro B-EA-10 a compresión	73
Figura 3.126 Media estadística del extensómetro B-EA-11 a compresión	74
Figura 3.127 Media estadística del extensómetro B-EA-12 a compresión	74
Figura 3.128 Media estadística del extensómetro B-EA-13 a compresión	75
Figura 3.129 Media estadística del extensómetro B-EA-14 a compresión	75
Figura 3.130 Media estadística del extensómetro B-EA-15 a compresión	76
Figura 3.131 Media estadística del extensómetro B-EA-16 a compresión	76
Figura 3.132 Media estadística del extensómetro B-EA-17 a compresión	77
Figura 3.133 Media estadística del extensómetro B-EA-18 a compresión	77
Figura 3.134 Media estadística del extensómetro B-EA-19 a compresión	78
Figura 3.135 Media estadística del extensómetro B-EA-20 a compresión	78
Figura 3.136 Media estadística del extensómetro B-EA-21 a compresión	79
Figura 3.137 Media estadística del extensómetro B-EA-22 a compresión	79
Figura 3.138 Media estadística del extensómetro B-EA-23 a compresión	80
Figura 3.139 Media estadística del extensómetro B-EA-24 a compresión	80
Figura 3.140 Señal típica de un extensómetro ante excitaciones ambientales	81
Figura 3.141 Señal típica de un extensómetro ante excitaciones ambientales	81
Figura 3.142 Espectro correlacionado.....	82
Figura 3.143 Variación de la frecuencia natural del modo 1	83
Figura 3.144 Variación de la frecuencia natural del modo 2	83
Figura 3.145 Variación de la frecuencia natural del modo 3	84
Figura 3.146 Variación de la frecuencia natural del modo 4	84
Figura 3.147 Variación de la frecuencia natural del modo 5	85
Figura 3.148 Variación de la frecuencia natural del modo 6	85
Figura 3.149 Variación de la frecuencia natural del modo 7	86
Figura 3.150 Forma modal de deformación del modo 1.....	86
Figura 3.151 Forma modal de deformación del modo 2.....	87
Figura 3.152 Forma modal de deformación del modo 3.....	87

Figura 3.153 Forma modal de deformación del modo 4	88
Figura 3.154 Forma modal de deformación del modo 5	88
Figura 3.155 Forma modal de deformación del modo 6	89
Figura 3.156 Forma modal de deformación del modo 7	89

Índice de tablas

Tabla 2.1 Sistema de monitoreo instalado en el puente Mezcala	5
Tabla 3.1 Valores de los modos del puente Mezcala	89

Sinopsis

El puente Mezcala es uno de los puentes atirantados que el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CeMPEI) del Instituto Mexicano del Transporte monitorea y realiza un seguimiento del desempeño de sus parámetros estructurales y modales.

El monitoreo y evaluación estructural del Puente Mezcala comenzó desde el año 2016 y derivado de la información obtenida del sistema de monitoreo se ha podido evaluar la condición estructural, identificar los parámetros modales como las frecuencias naturales y formas modales en el rango de 0 a 1 Hz, desarrollar y calibrar modelos de elemento finito, y analizar en corto plazo la integridad de la estructura después de la ocurrencia de fenómenos naturales.

La importancia de tener información actualizada y conocer el desempeño de la estructura en condiciones de operación normal es invaluable, el tiempo de respuesta para evaluar la condición estructural es un factor que se minimiza y permite tener estrategias oportunas y seguras en caso de detección de daño provocado por fenómenos naturales, accidentes y degradación de los elementos estructurales.

En este trabajo se evaluó el desempeño de los parámetros estructurales del Puente Mezcala durante el año 2018.

(Palabras clave: *Monitoreo Estructural, Puentes, Parámetros modales*)

Abstract

The Mezcala bridge is one of the cable-stayed bridges that the Intelligent Bridges and Structures Monitoring Center (CeMPEI) of the Mexican Transportation Institute is remote monitoring in real-time.

The monitoring and structural evaluation of the Mezcala bridge began since 2016, the monitoring data has been used to evaluate the actual structural condition, to identify the modal parameters such natural frequencies and mode shapes in a range below 1 Hz, to develop and update finite element models, and to analyze the structure's integrity shortly after a natural phenomena occurrence.

The importance of having updated information and knowing the performance of the structure in normal operating conditions is invaluable, the response time for structural evaluation is minimum and allows having timely and safe strategies in case of damage detection caused by natural phenomena, accidents and degradation of structural elements.

In this work it was evaluated the performance of the structural parameters of the Mezcala bridge during the year 2018.

(Key words: *Structural Health Monitoring, Bridges, Modal parameters*)

Resumen ejecutivo

A partir del año 2016 se instrumentó y comenzó el monitoreo en tiempo real del puente Mezcala con el objetivo de evaluar y garantizar su integridad estructural. Las actividades que se han llevado a cabo desde la implementación del sistema de monitoreo han sido identificar los parámetros modales del puente lo que ha permitido generar y calibrar modelos de elemento finito que sirven como una ayuda para simular escenarios críticos que permiten establecer niveles de alarma, así como la identificación de los rangos de operación normal de los sensores bajo condiciones de operación normal.

Con relación a las actividades anteriormente descritas, la información del sistema de monitoreo es analizada y jerarquizada en tres niveles: el primero corresponde al análisis individual de los sensores para determinar su comportamiento estructural mediante un criterio de alarmas; el segundo corresponde al análisis de varios sensores para determinar índices de desempeño; y el tercero corresponde al análisis de la información para aplicar algoritmos de detección de daño y análisis estructural.

Este trabajo presenta resultados de la actualización y seguimiento de los índices de desempeño estructural del puente Mezcala durante el año 2018.

1 Introducción

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en conjunto con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) han participado en el Programa Integral de Seguridad de Puentes, el cual, comprende el desarrollo de sistemas de gestión, instrumentación de puentes, implantación de sistemas de monitoreo remoto y la evaluación estructural periódica. En especial, el monitoreo remoto de puentes se considera fundamental para conocer la condición de los puentes más importantes del país y establecer estrategias de conservación más efectivas, eficientes y económicas. Al mismo tiempo, se considera el monitoreo remoto de un conjunto de 6 puentes “tipo”, que son representativos de más del 60% del inventario de los puentes en la red federal de México y cuyo objeto es estudiar, en un periodo de 10 años, el comportamiento de los mismos y contar con una plataforma de investigación para desarrollar modelos de análisis que permitan calcular con mayor precisión la capacidad de carga y vida útil de los mismos, contribuyendo con información objetiva para la conservación, rehabilitación o sustitución de esos puentes.

El proyecto de monitoreo remoto para puentes se estructura con base en el denominado Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes de la SCT (CeMPEI), ya que se planea extender su cobertura no sólo a puentes, sino también otros tipos de estructuras dentro de la red de comunicaciones del país, tales como son los túneles, carreteras, vías de ferrocarril, puertos, etc. Actualmente, se tiene proyectado instalar el CeMPEI dentro de las instalaciones del IMT, pero dadas las alternativas de comunicación actuales, el monitoreo mismo podrá ser una realidad desde casi cualquier dispositivo electrónico de comunicación portátil. El resguardo, procesamiento y análisis de la información se realizará en las instalaciones del IMT por el personal técnico e investigadores a cargo de ello. En su primera etapa, la capacidad inicial de monitoreo remoto del CeMPEI está planeada para 20 puentes especiales y seis puentes “tipo”, pero su diseño está conceptualizado para crecer modularmente según se requiera.

Para la evaluación y seguimiento del comportamiento estructural de puentes, actualmente no se cuenta con un esquema que permita dar un seguimiento continuo en tiempo real y que sea capaz de determinar la capacidad estructural ni la vida remanente de los puentes en las redes de comunicación terrestre de México.

Hoy por hoy, se realizan únicamente inspecciones visuales periódicas a través de las cuales se determinan los índices de la condición estructural de los puentes. El periodo típico para las inspecciones visuales de un puente es de un año y están limitadas a la capacidad de observación de los inspectores y a su experiencia y

conocimientos. Así también, las inspecciones visuales son incapaces de detectar daños o deterioros internos en las estructuras, los cuales normalmente florecen a la superficie cuando son críticos.

El Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes propone la creación de una plataforma estructurada para el monitoreo remoto y continuo de los puentes más importantes de México. Las inspecciones no sólo incluirían las evaluaciones visuales; sino también, en forma muy importante, evaluaciones dinámicas que permiten evaluar y detectar daños internos en forma oportuna y dar seguimiento a las mismos continuamente hasta que puedan llegar a una condición que amerite acciones de rehabilitación y evaluaciones específicas cuando ocurran eventos extraordinarios de sobrecarga, sismos, huracanes, etc. Asimismo, estos sistemas proporcionan la información suficiente para efectuar estudios de confiabilidad estructural, determinar la capacidad estructural de los puentes y estimar la vida útil de los puentes bajo diferentes escenarios de operación y mantenimiento; todo ello, en forma continua y permanente.

Una herramienta fundamental del centro de monitoreo es tener la información dinámica de los puentes en tiempo real y de forma continua por lo que se solicitó a la Secretaria de Comunicaciones y Transportes la instalación de sistemas satelitales para la transmisión y recepción de la información en tiempo real en el centro de monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes para cumplir las siguientes necesidades

- Seguridad: Garantizar la seguridad de los usuarios al contar con información en tiempo real sobre la condición estructural de los puentes, sobre todo después de presentarse fenómenos naturales atípicos como sismos, vientos fuertes, o desbordamiento de ríos; o bien, accidentes por errores humanos que afecten la integridad de los puentes.
- Conservación de la infraestructura carretera: Dar seguimiento al comportamiento de los puentes mediante índices de desempeño estructural, mediante los cuales se podrán identificar los componentes estructurales vulnerables y planear las acciones de mantenimiento preventivo en forma eficiente y efectiva. Con esto, se identificará el daño en las estructuras en forma incipiente, por lo que se las acciones de mantenimiento serán menos costosas y se podrá incrementar la vida útil de los puentes y, como consecuencia, producirá ahorros en inversión de nueva infraestructura.
- Presupuesto: La documentación sobre el comportamiento estructural, el índice de desempeño y el monitoreo permanente de los puentes, permitirá demostrar que existe un sistema eficiente para la preservación de la infraestructura del transporte, con el que se podrán negociar pólizas de seguro en forma efectiva y a un menor costo. En un largo plazo, el monitoreo de puentes mediante un sistema de gestión efectivo, permitirá administrar en forma efectiva los recursos financieros destinados a la conservación,

atendiendo los casos más urgentes en forma anticipada y previendo los gastos futuros de acuerdo a los registros históricos de cada puente.

- Operación: El CMPEI permitirá tener una vigilancia del tráfico de vehículos que circulan sobre los puentes y éstos podrán ser utilizados como pesadoras dinámicas, por lo que se podrán detectar vehículos sobrecargados que violan los reglamentos de pesos y dimensiones, con lo cual se podrá incrementar la vida útil de las carreteras y los puentes. La información proveniente del centro de monitoreo servirá para estudios de prospectiva y análisis de riesgos de la infraestructura carretera.

El puente Mezcala (figura 1.1) consta de una superestructura de seis claros, con tablero formado por dos trabes de acero longitudinales metálicas de sección I y losa de concreto reforzado, cuatro de los claros del puente son de tipo atirantado con semi-arpas, está formado por tres pilones de concreto, cuenta con una longitud total de 911 m con una longitud del claro principal de 311 m y un ancho de 20 m, la altura de la pila principal es de 213 m y la distancia máxima del tablero al lecho del río es de 140 m.



Figura 1.1 Puente Mezcala

El puente Mezcala se ubica en el municipio de Mártir de Cuilapan, Gro. cruza el río Balsas, está situado en las coordenadas geográficas: 17°56'8.24" N, 99°22'13.05" O, en el kilómetro 221 de la Autopista del Sol (95D) que comunica a la ciudad de Cuernavaca en el estado de Morelos con Acapulco, en la costa del estado de Guerrero (figura 1.2).

Debido a la importancia del puente Mezcala en la actividad económica de México, el costo de la estructura, el tipo de la estructura, la longitud total del puente, la

longitud del claro principal y que el puente se ubica en una zona de alta actividad sísmica, se seleccionó como uno de los puentes para instrumentar y monitorear en tiempo real en el centro de monitoreo de puentes y Estructuras inteligentes del Instituto Mexicano del Transporte.



Figura 1.2 Ubicación geográfica del puente Mezcala

Esta investigación, permitirá contar con información de utilidad consistente, la cual vendrá a contribuir al cumplimiento del objetivo 6: “Desarrollar integralmente y a largo plazo al sector con la creación y adaptación de tecnología y la generación de capacidades nacionales[6]”, mismo que se encuentre alineado al objetivo 4.9 “Contar con una infraestructura de transporte que se refleje en menores costos para realizar la actividad económica [7]”, de la meta nacional IV México Próspero del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018.

2 Sistema de monitoreo puente Mezcala

El sistema de adquisición de datos y monitoreo permanente del puente Mezcala tiene tres módulos principales para su funcionamiento; el primero, es el módulo de sensores y equipos de adquisición y pre procesamiento de datos, el segundo es el módulo de energización y el tercer módulo es el de comunicaciones remotas.

El módulo de sensores equipos de adquisición y pre procesamiento de datos del puente Mezcala consta de 36 acelerómetros, 16 inclinómetros, 10 extensómetros de concreto, 48 extensómetros de acero, 11 sensores de temperatura, un medidor de desplazamiento, dos cámaras de video, una estación climatológica, un interrogador, un multiplexor y una unidad de control. Cada uno de los sensores y equipos instalados persigue objetivos particulares para el monitoreo de la integridad estructural del puente Mezcala. En la tabla 2.1 se pueden consultar el número, marca y modelos de los equipos y sensores instalados.

Tabla 2.1 Sistema de monitoreo instalado en el puente Mezcala

Cant	Nombre	Descripción	Marca	Modelo
1	Interrogador	Equipo de adquisición de datos de fibra óptica de 4 canales con frecuencia de adquisición máxima de 1000 Hz	Micron Optics	sm-130
1	Multiplexor	Equipo que divide el haz de luz de los canales del interrogador para tener 16 canales	Micron Optics	sm-041
1	Sensor de desplazamiento	Sensor empleado para medir desplazamientos	Micron Optics	os5100
11	Sensores de temperatura	Sensor empleado para medir cambios de temperatura	Micron Optics	os4350
16	Inclinómetros	Sensor empleado para medir inclinaciones	FBG TECH	T1-310
36	Acelerómetros	Sensor empleado para medir respuestas dinámicas	Micron Optics	os7100
10	Extensómetros	Sensor empleado para medir deformaciones unitarias en concreto	Micron Optics	os3600
48	Extensómetros	Sensor empleado para medir deformaciones unitarias en acero	Micron Optics	os3000

Los acelerómetros fueron seleccionados para medir las respuestas dinámicas de las pilas y de algunos de los tirantes. La información proporcionada por ellos permitirá conocer el desempeño estructural de las torres bajo condiciones de operación normal, evaluar la integridad estructural de las mismas posterior a sismos, ráfagas de viento o accidentes. Por otro lado, los acelerómetros instalados en algunos de los tirantes serán utilizados para determinar la tensión de los cables.

Los inclinómetros tienen la finalidad de dar seguimiento del nivel de inclinación de las pilas en el tiempo y determinar si existe una inclinación permanente posterior a un evento sísmico.

La función de los extensómetros de acero y de concreto es la de determinar la dinámica del puente y asociar las deformaciones con la carga de vehículos y aquellas asociadas con los cambios de temperatura durante el día o estación del año. La información proporcionada por estos sensores es fundamental para la calibración de modelos de elemento finito y para la implementación de técnicas de detección de daño.

Los sensores de temperatura persiguen el objetivo de proporcionar información de los cambios de temperatura en diferentes secciones del puente y correlacionar la información con las deformaciones para poder asociar el nivel de deformación por incremento de temperatura.

El medidor de deslizamiento es utilizado para conocer la deformación de la junta de expansión por cambios de temperaturas globales y condiciones normales de operación.

Para adquirir la información de cada uno de los sensores es necesario un sistema que consta de una computadora que controla la frecuencia de adquisición de datos del sistema, el tamaño de los archivos, la visualización de la información y de un interrogador que controla y adquiere el valor de cada sensor en intervalos iguales de tiempo. Una vez instalado, este equipo tiene capacidad para interrogar 16 canales utilizando un multiplexor (figura 2.1).

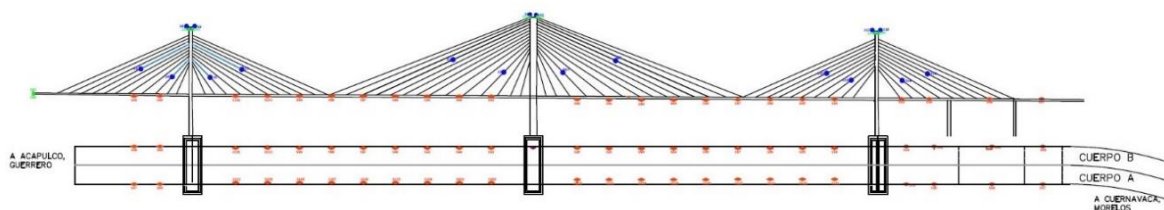


Figura 2.1 Instrumentación del puente Mezcala

En total, el puente Mezcala tiene instalados 122 sensores de fibra óptica, los cuales están distribuidos en 14 canales de adquisición. Para tener una mayor sensibilidad los sensores fueron agrupados por tipos de sensores, de tal manera que cuatro canales fueron utilizados para conectar acelerómetros, dos canales para

inclinómetros y ocho canales para los sensores de deformación. A su vez, los sensores de deformación fueron divididos en seis canales para sensores instalados en acero y dos canales para sensores instalados en concreto.

3 Seguimiento de los parámetros estructurales del puente Mezcala

A partir del año 2016 se ha dado seguimiento a los parámetros estructurales del puente Mezcala a través del seguimiento de los valores de referencia iniciales de cada parámetro (deformación, inclinación, tensión, frecuencia natural, etc.), el análisis de cada parámetro bajo condiciones de operación normal, mediante el análisis estadístico de cada variable y la evaluación de los cambios en los parámetros de acuerdo al mantenimiento preventivo realizado o algún tipo de daño encontrado. Las variables seguidas en los últimos seis años han permitido establecer estrategias de mantenimiento, protocolos de actuación ante daño, la evaluación de la efectividad del mantenimiento realizado, evaluar la condición estructural posterior a sismos, garantizar la seguridad de los usuarios y la integridad del puente.

A continuación, en las figuras 3.1 a 3.40 se puede observar el valor de referencia de deformación desde que fueron instalados los extensómetros de fibra óptica en el 2016 y hasta el año de 2018. En cada uno de los gráficos se muestra la fecha del reencarpetado de la carpeta asfáltica mediante una línea. Desafortunadamente debido a problemas de comunicación y energización del sistema de monitoreo no fue posible obtener datos del monitoreo en un considerable periodo de tiempo.

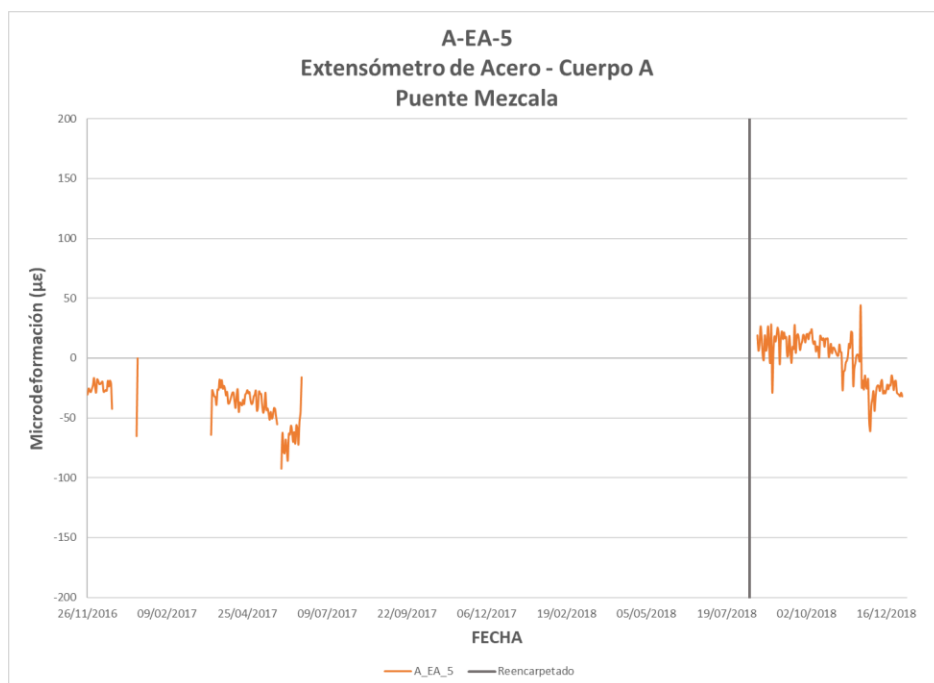


Figura 3.1 Valores de deformación del extensómetro A-EA-5

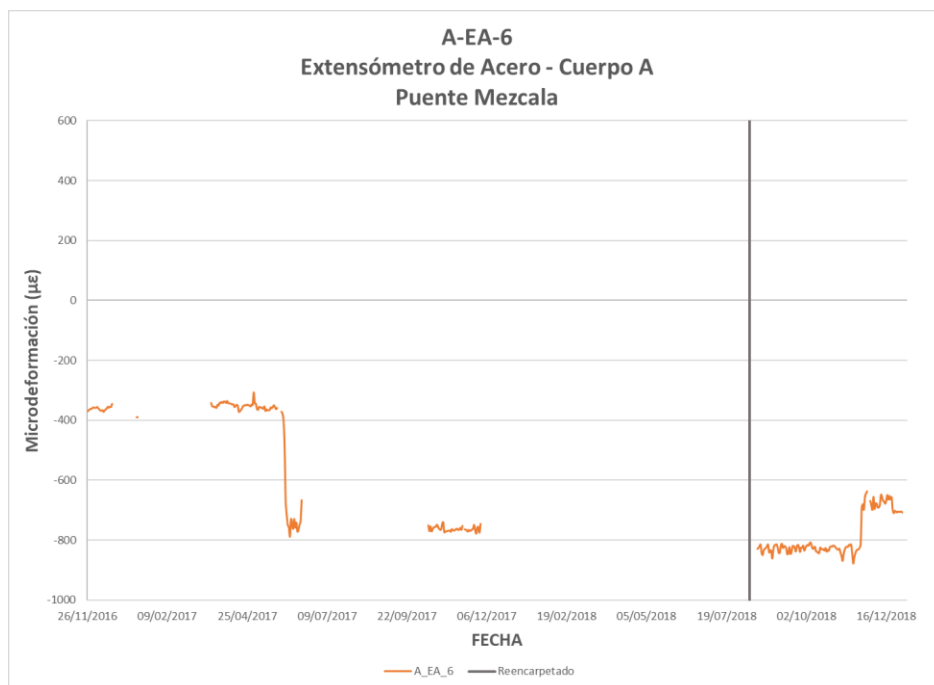


Figura 3.2 Valores de deformación del extensómetro A-EA-6

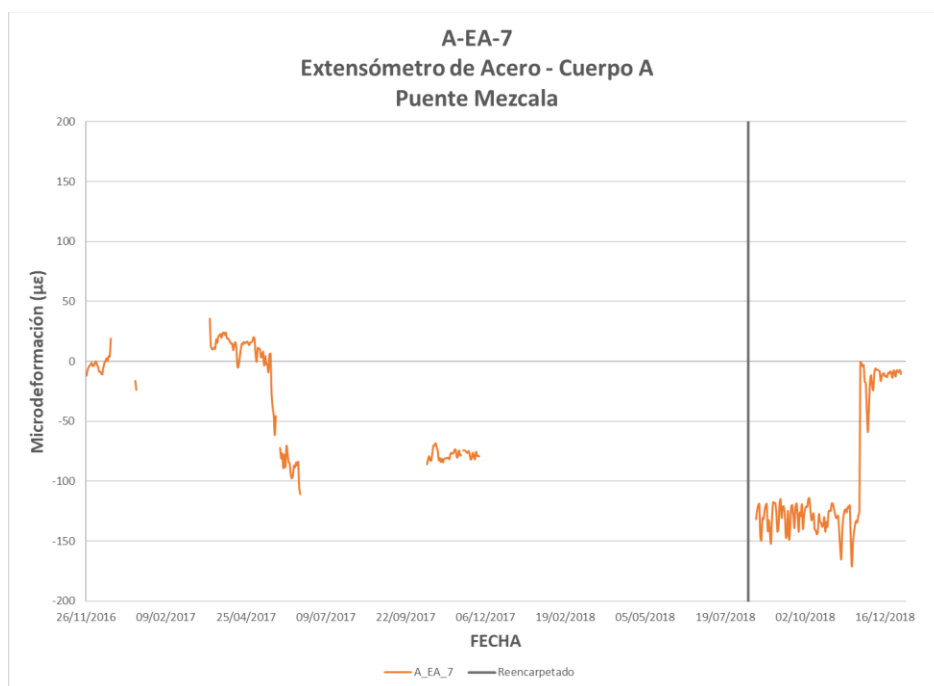


Figura 3.3 Valores de deformación del extensómetro A-EA-7

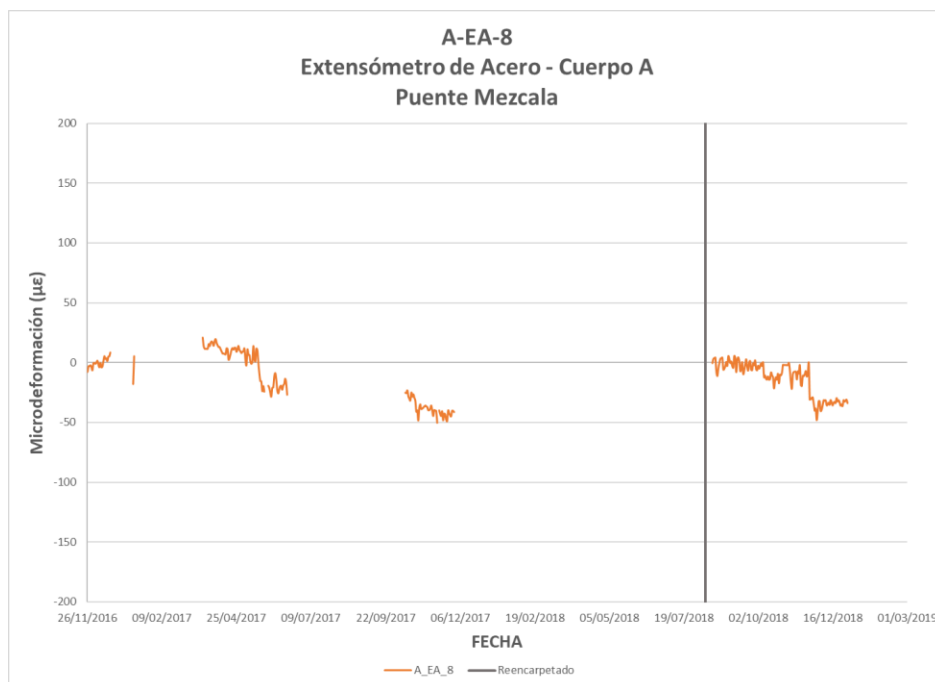


Figura 3.4 Valores de deformación del extensómetro A-EA-8

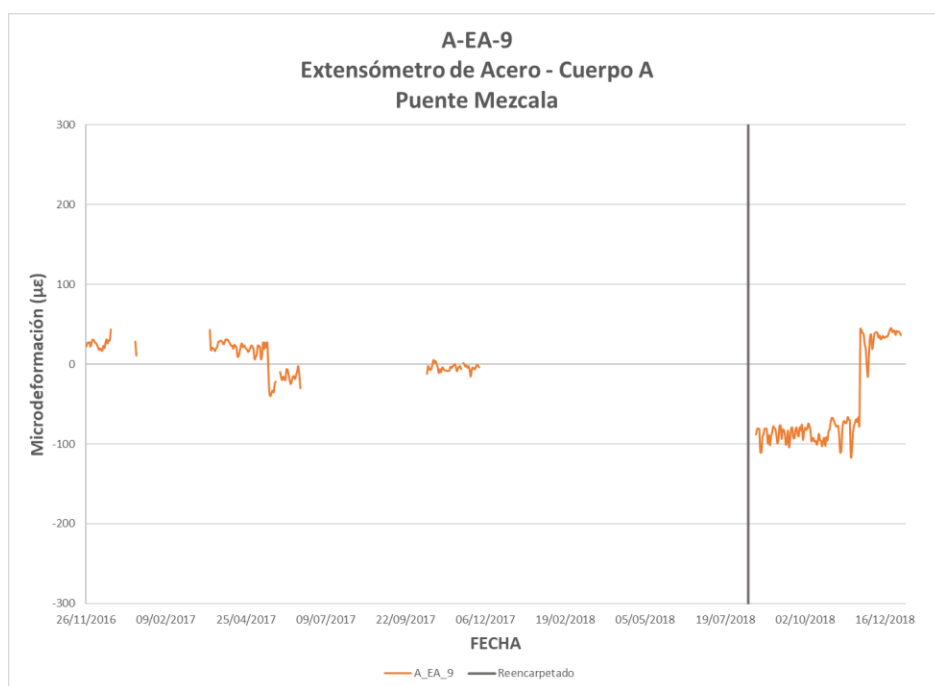


Figura 3.5 Valores de deformación del extensómetro A-EA-9

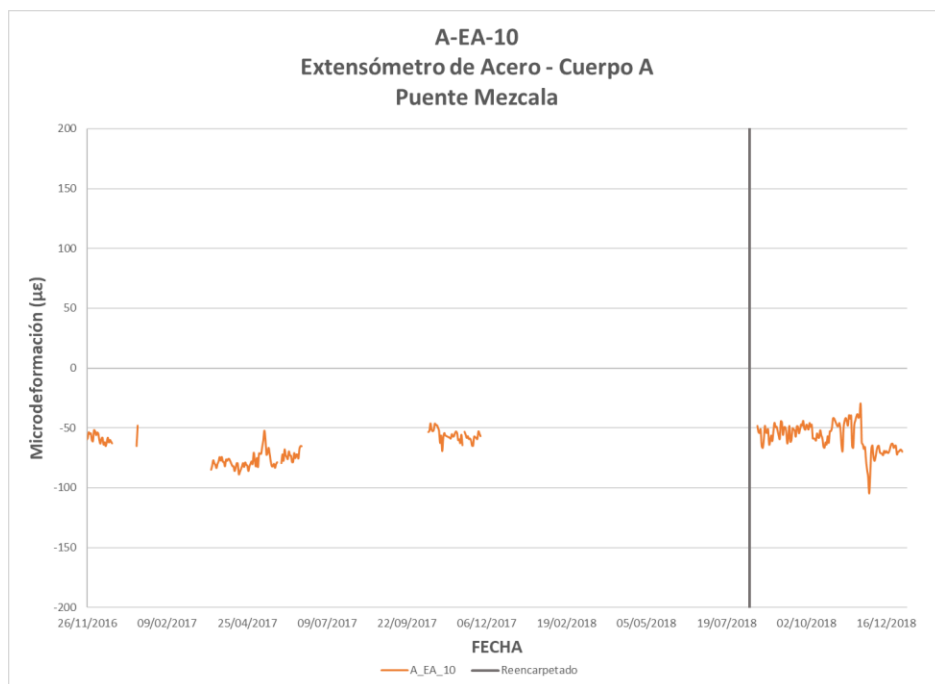


Figura 3.6 Valores de deformación del extensómetro A-EA-10

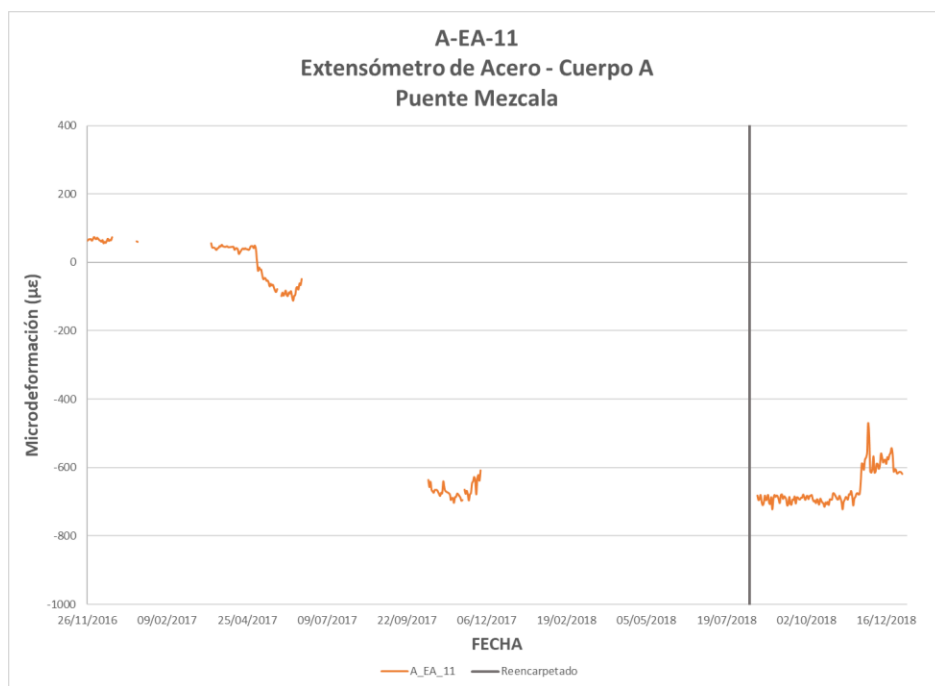


Figura 3.7 Valores de deformación del extensómetro A-EA-11

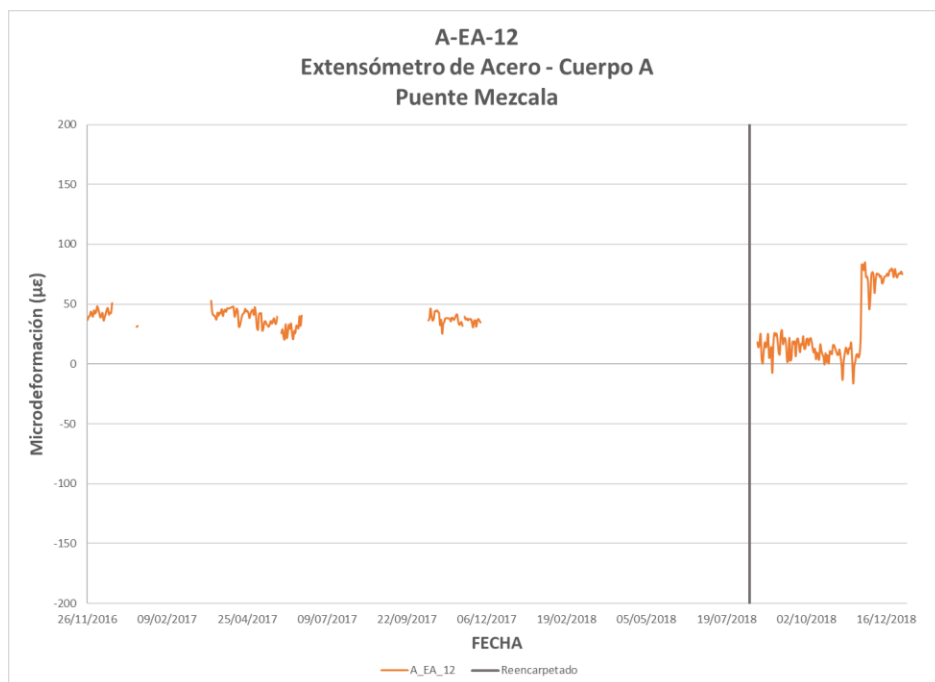


Figura 3.8 Valores de deformación del extensómetro A-EA-12

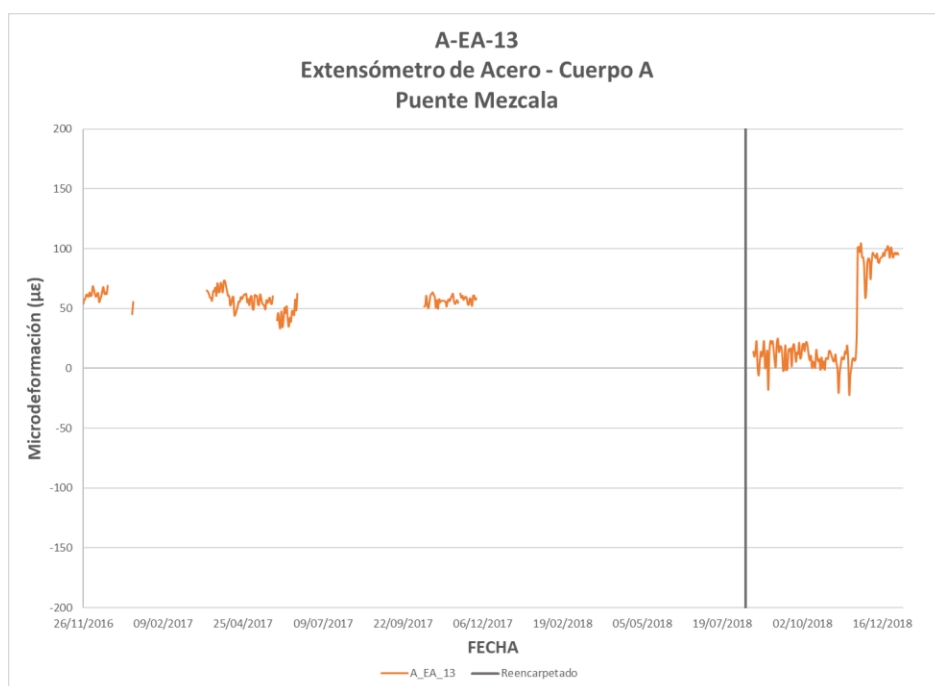


Figura 3.9 Valores de deformación del extensómetro A-EA-13

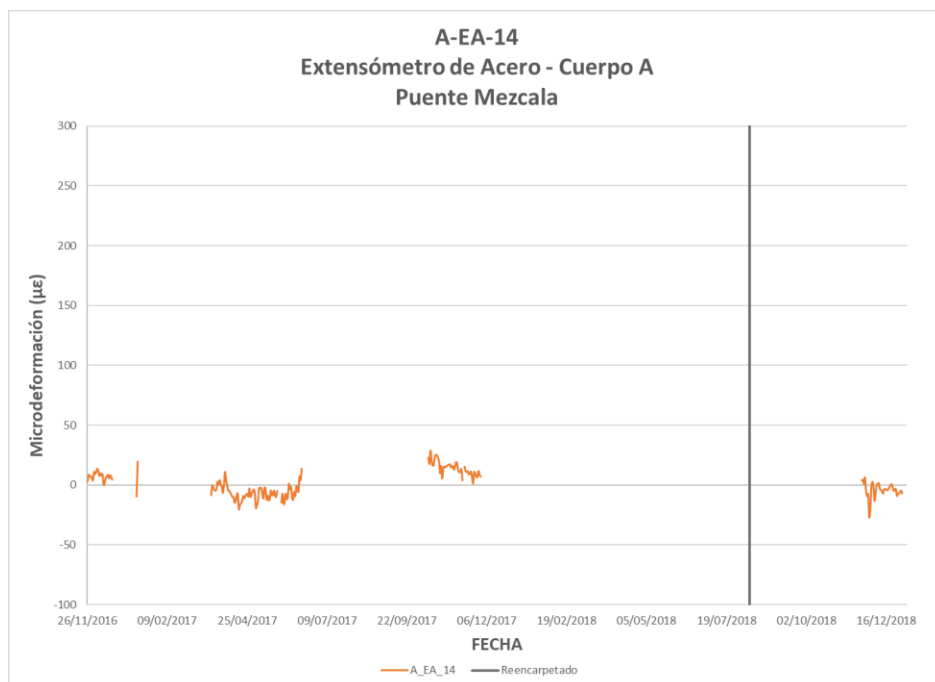


Figura 3.10 Valores de deformación del extensómetro A-EA-14

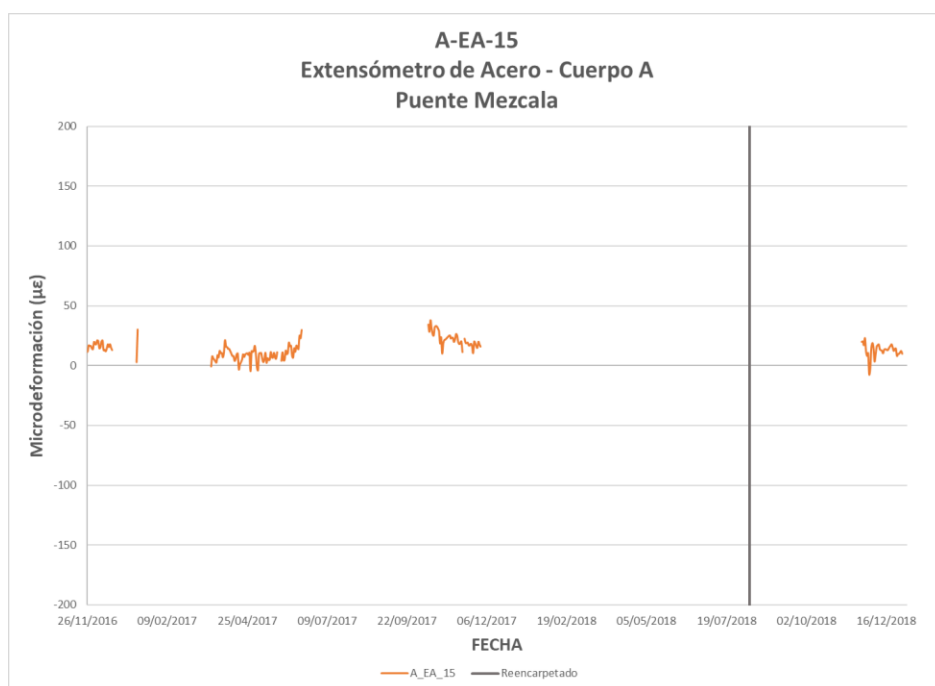


Figura 3.11 Valores de deformación del extensómetro A-EA-15

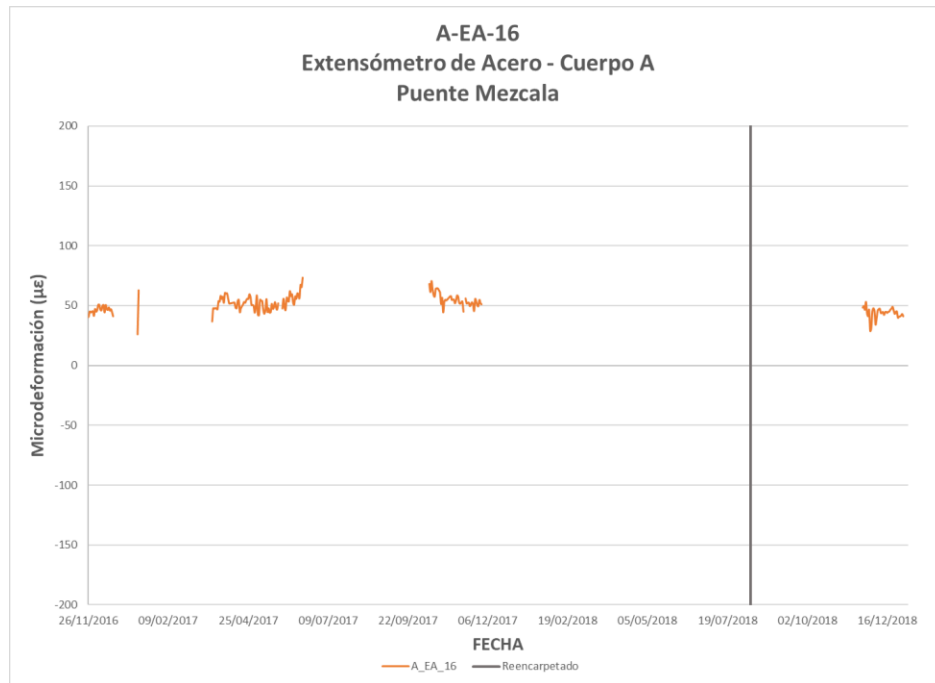


Figura 3.12 Valores de deformación del extensómetro A-EA-16

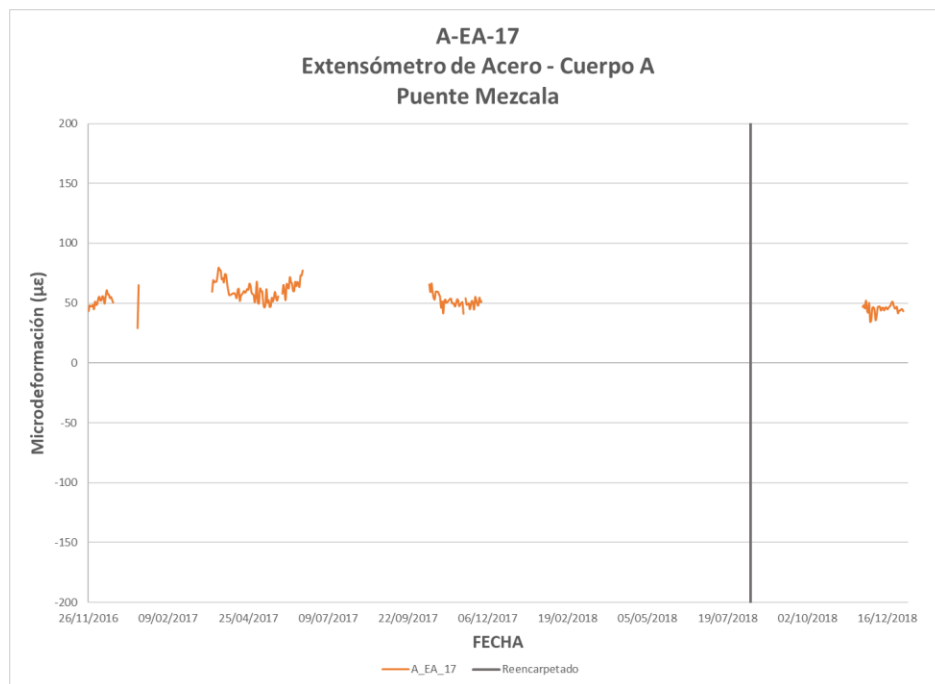


Figura 3.13 Valores de deformación del extensómetro A-EA-17

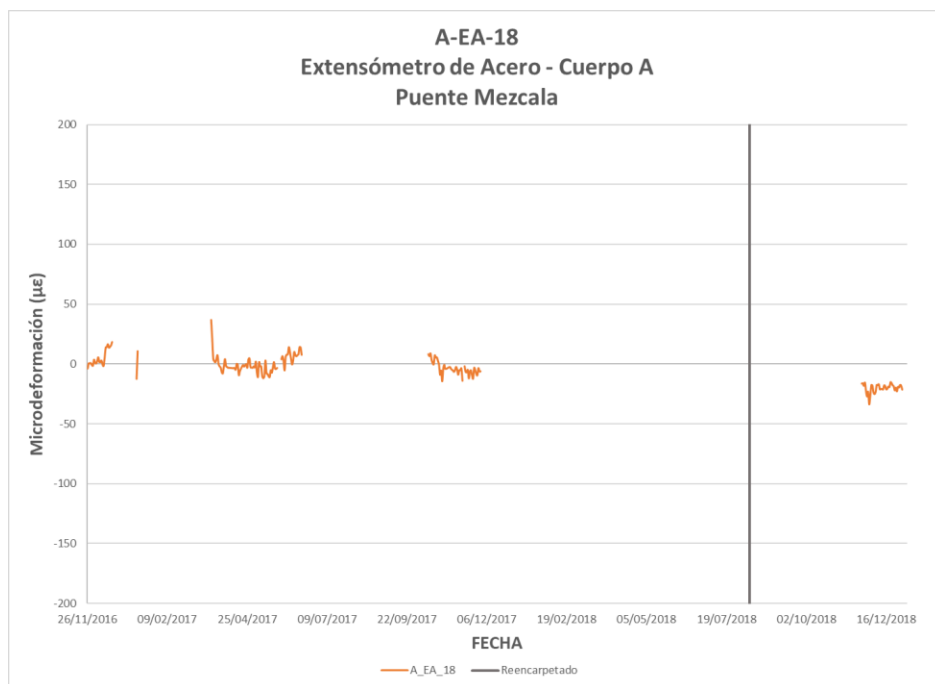


Figura 3.14 Valores de deformación del extensómetro A-EA-18

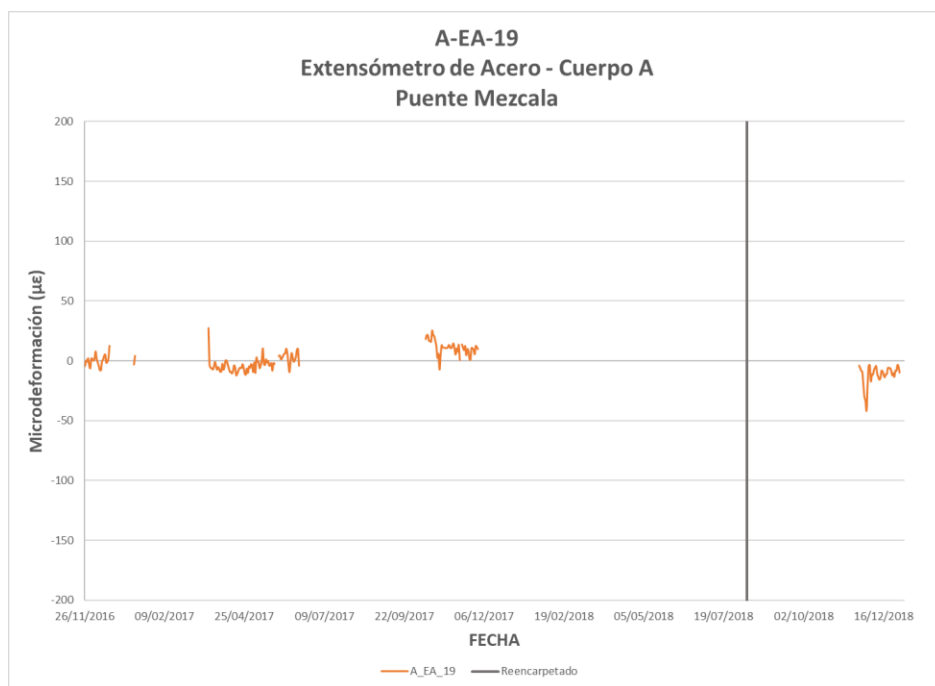


Figura 3.15 Valores de deformación del extensómetro A-EA-19

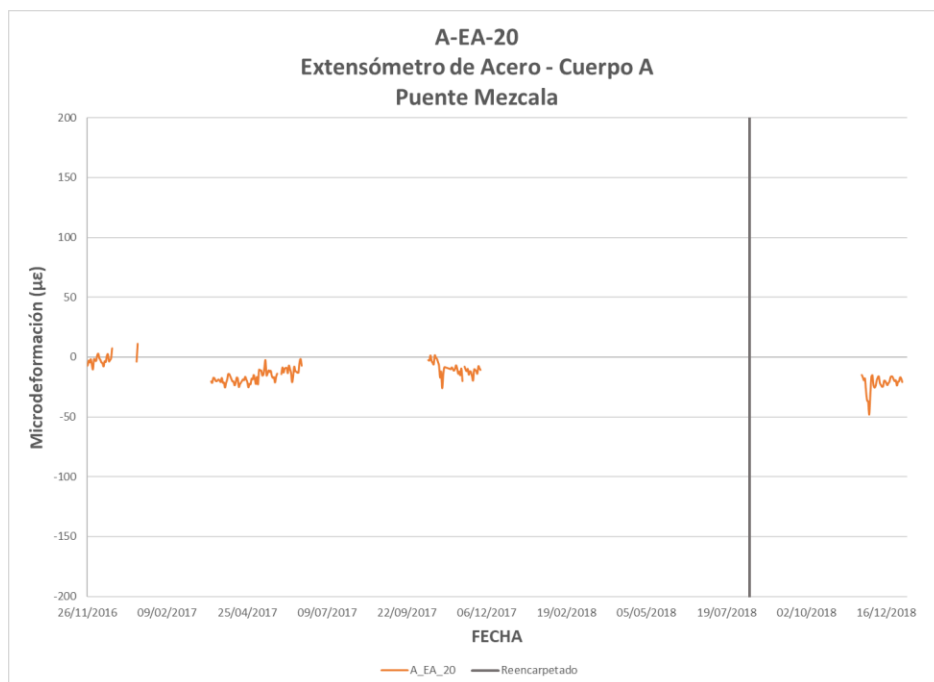


Figura 3.16 Valores de deformación del extensómetro A-EA-20



Figura 3.17 Valores de deformación del extensómetro A-EA-21

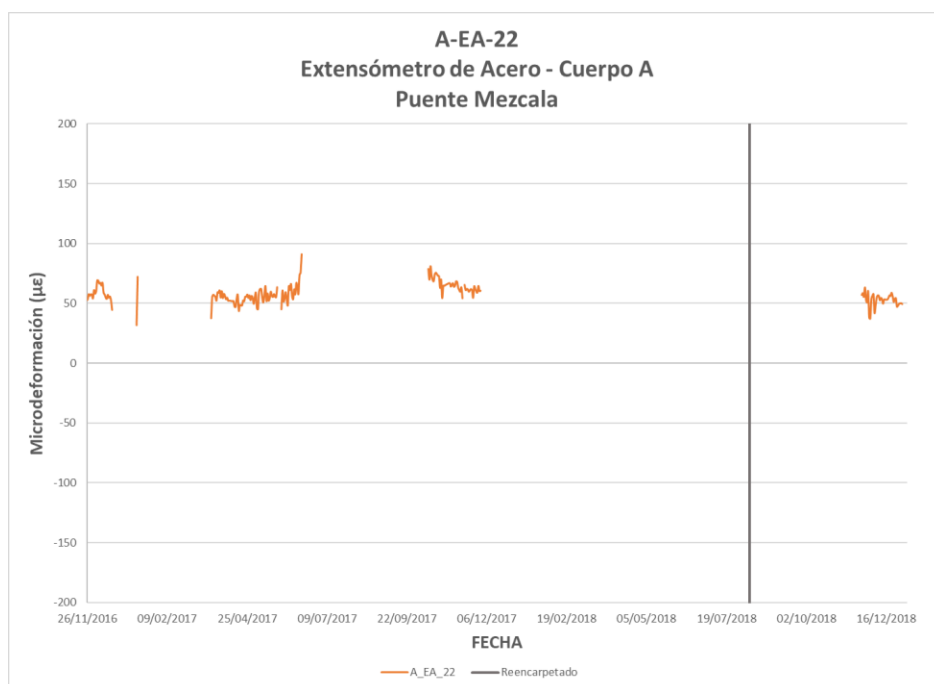


Figura 3.18 Valores de deformación del extensómetro A-EA-22

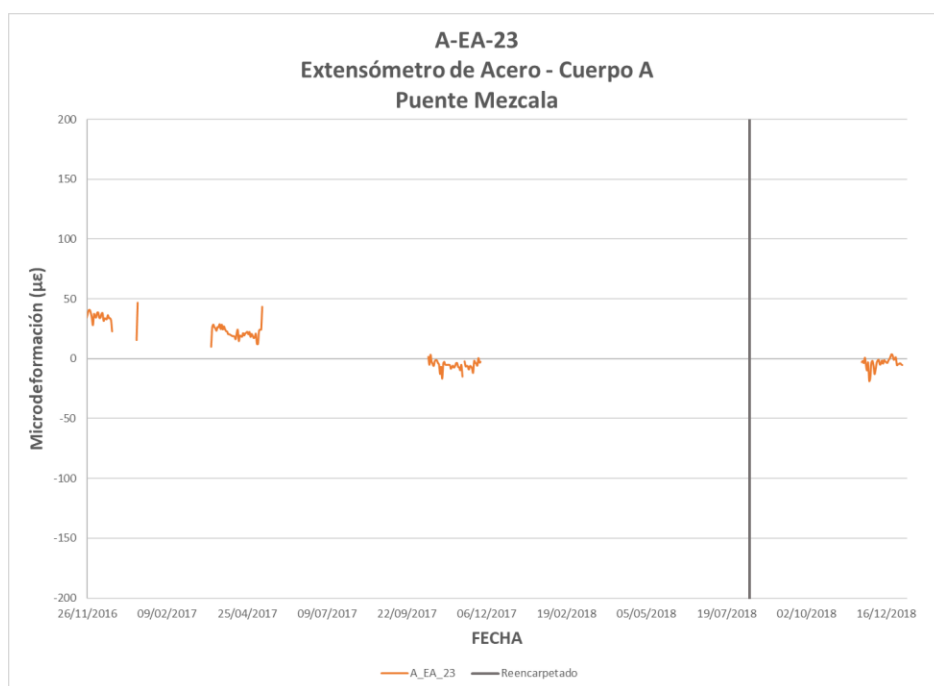


Figura 3.19 Valores de deformación del extensómetro A-EA-23

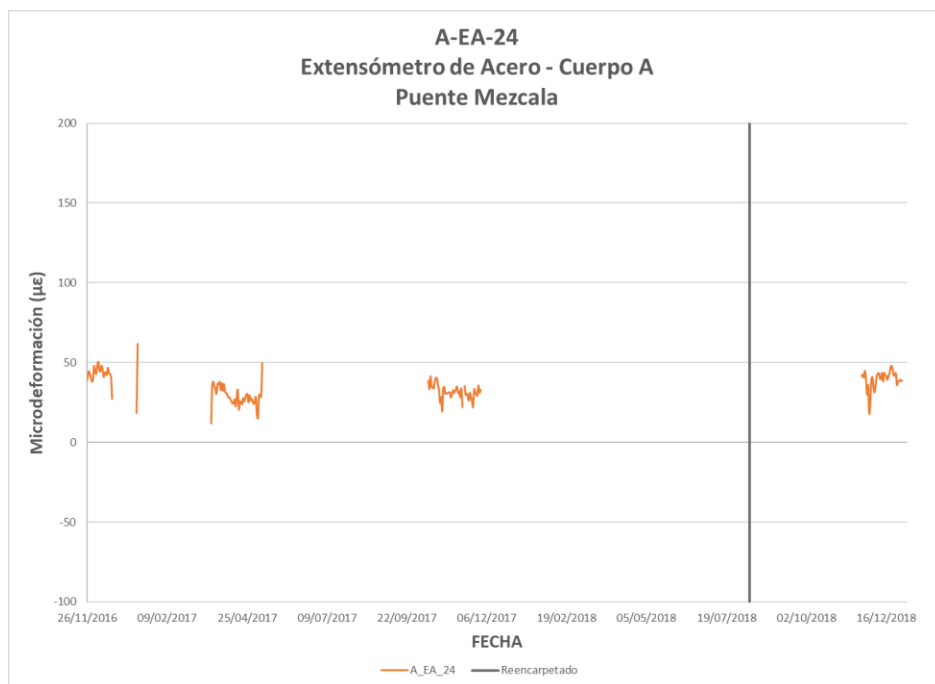


Figura 3.20 Valores de deformación del extensómetro A-EA-24

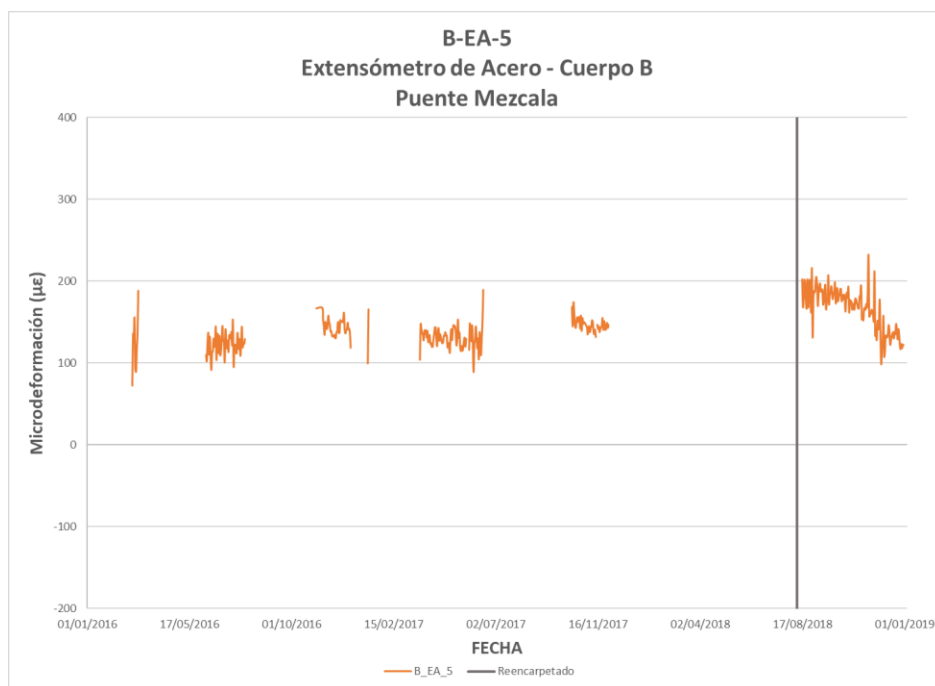


Figura 3.21 Valores de deformación del extensómetro B-EA-5

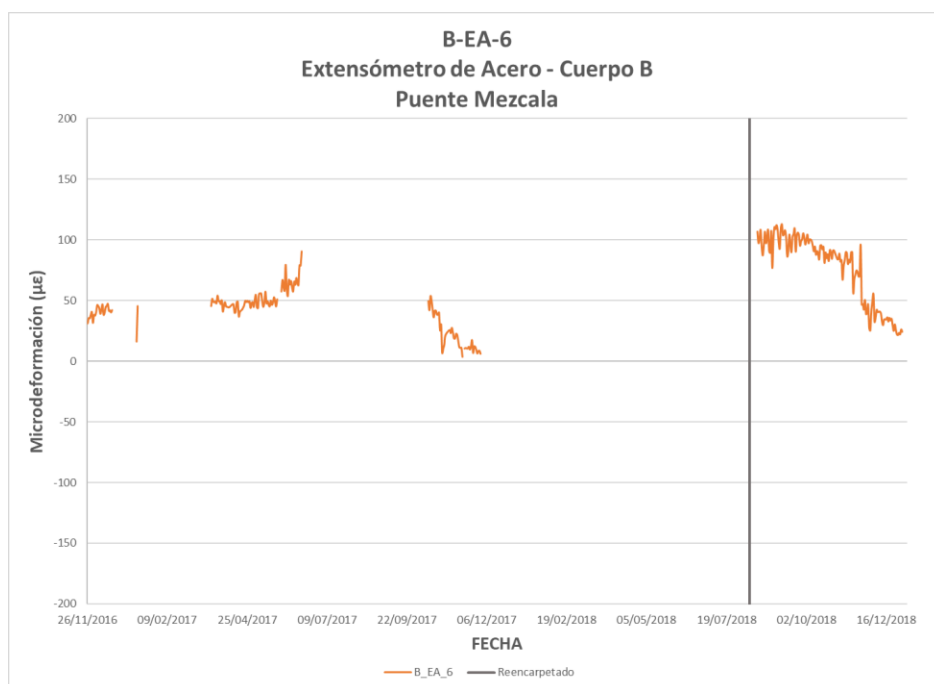


Figura 3.22 Valores de deformación del extensómetro B-EA-6

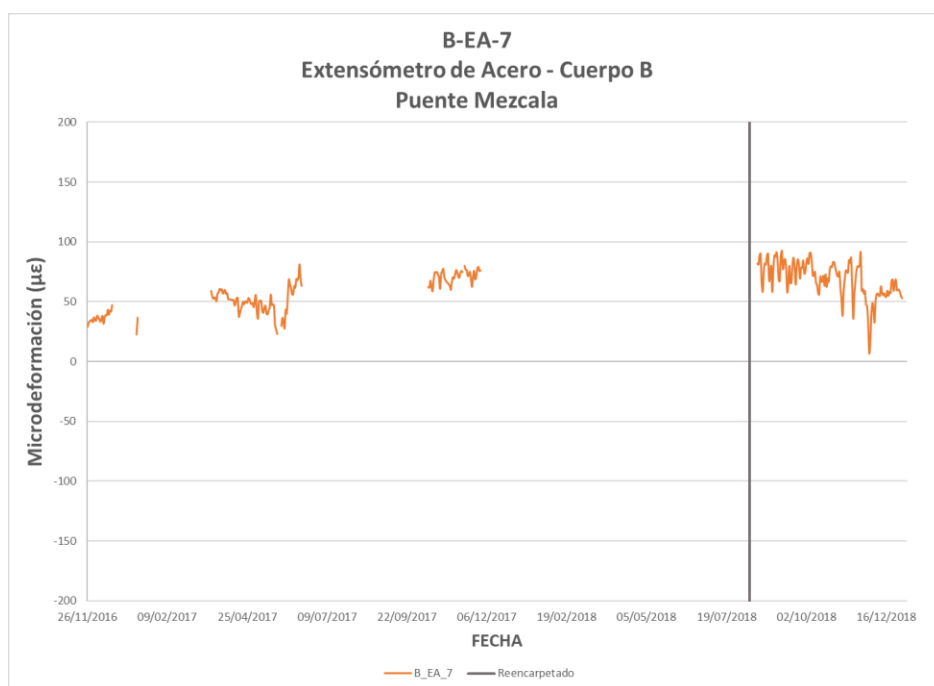


Figura 3.23 Valores de deformación del extensómetro B-EA-7

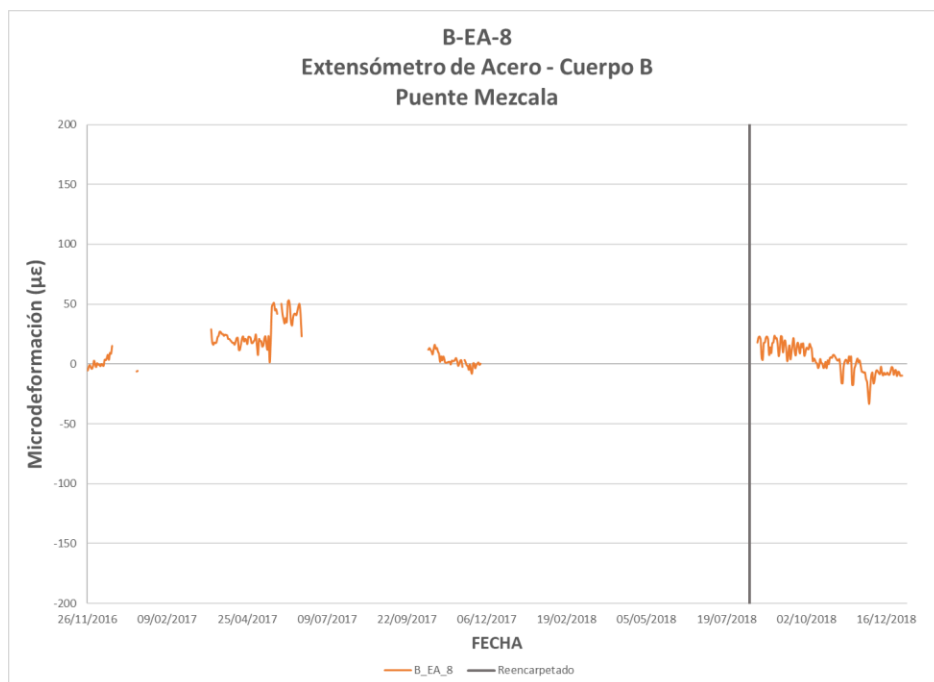


Figura 3.24 Valores de deformación del extensómetro B-EA-8

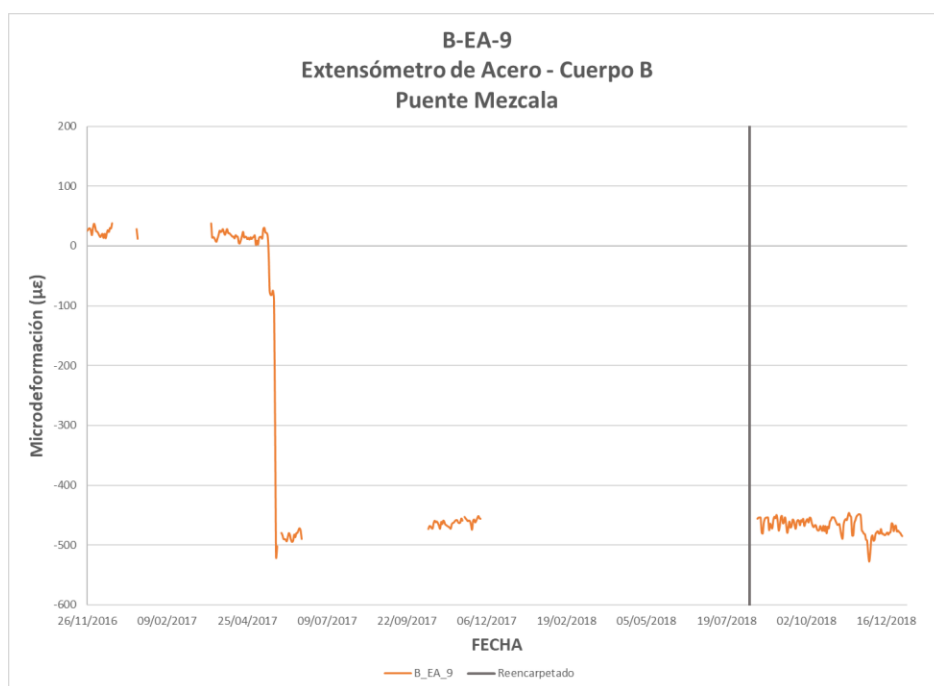


Figura 3.25 Valores de deformación del extensómetro B-EA-9

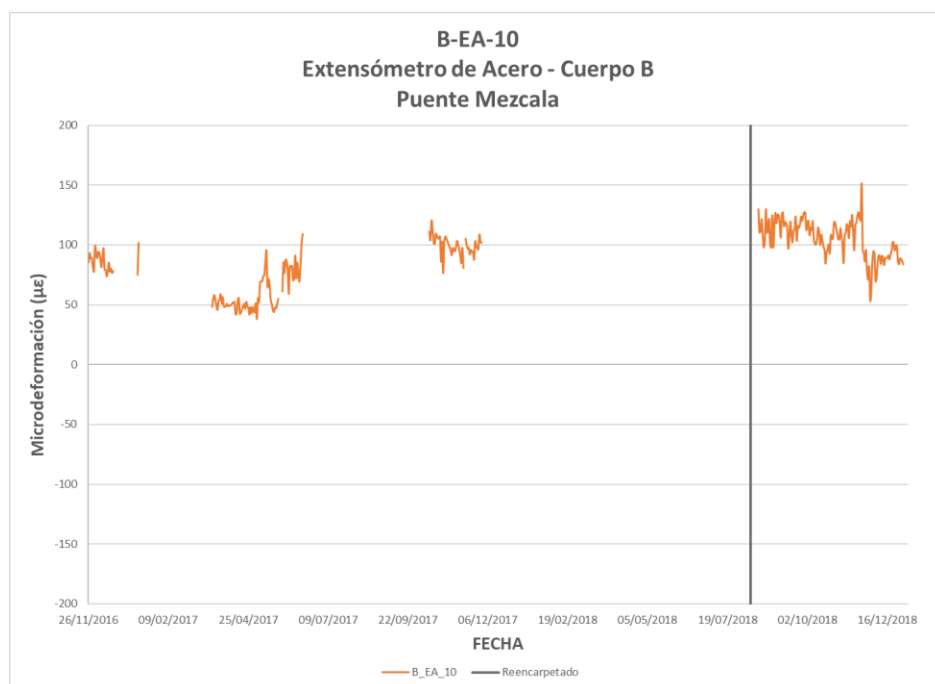


Figura 3.26 Valores de deformación del extensómetro B-EA-10

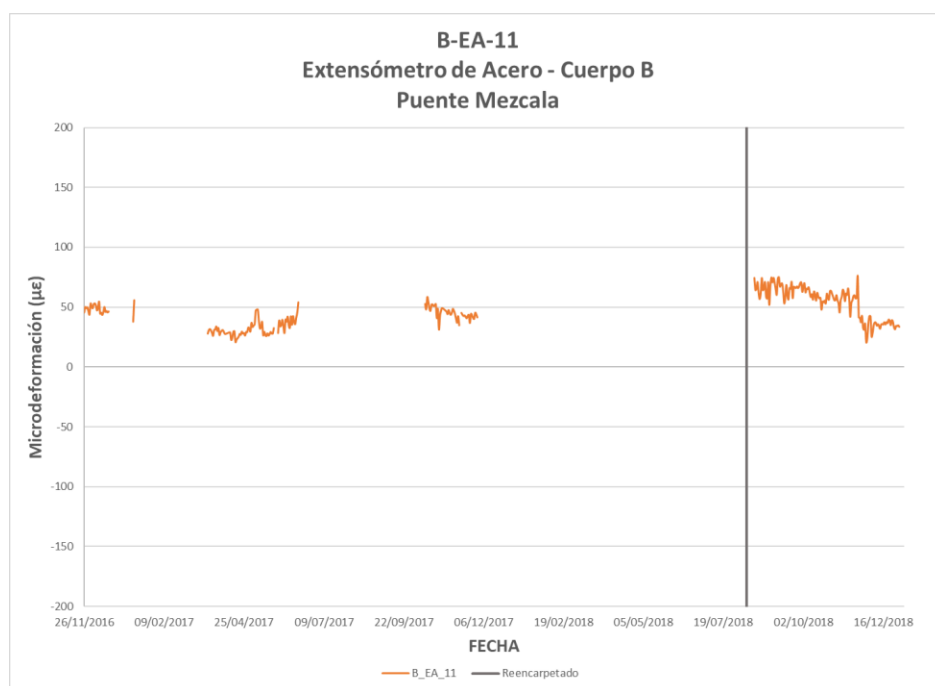


Figura 3.27 Valores de deformación del extensómetro B-EA-11

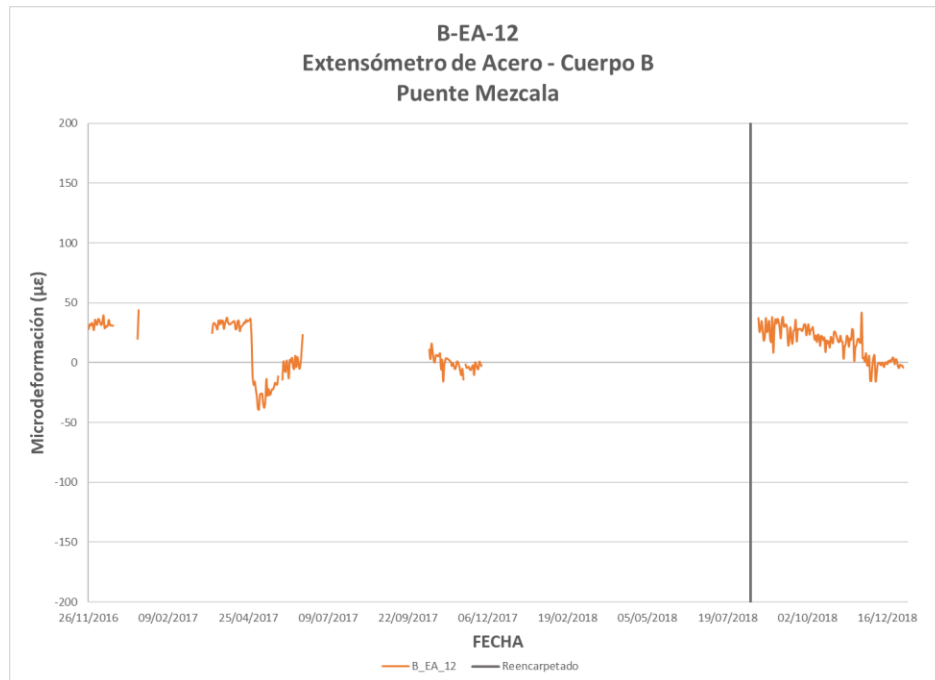


Figura 3.28 Valores de deformación del extensómetro B-EA-12

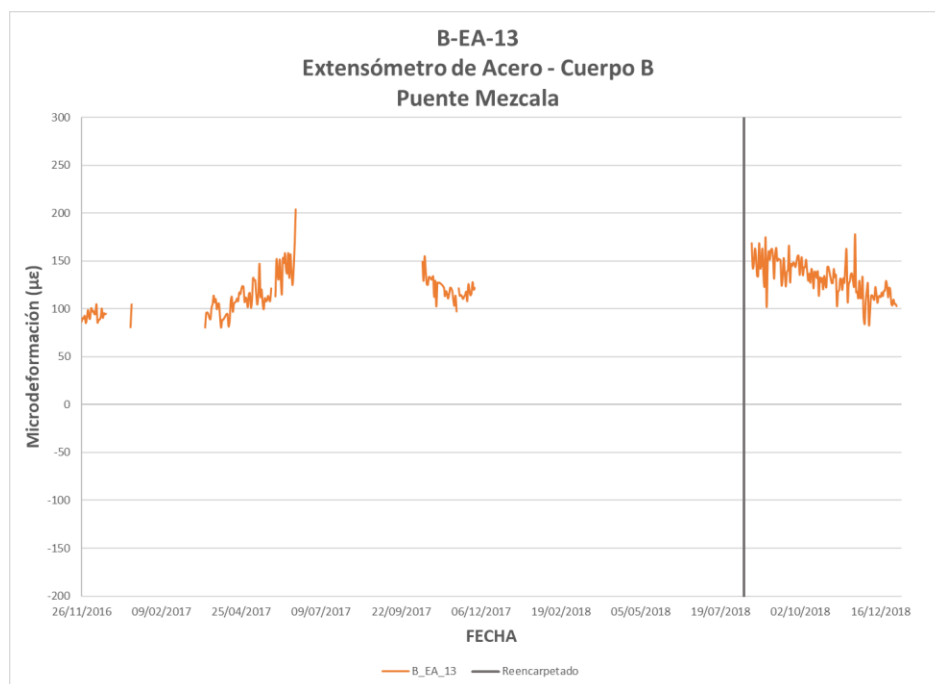


Figura 3.29 Valores de deformación del extensómetro B-EA-13



Figura 3.30 Valores de deformación del extensómetro B-EA-14



Figura 3.31 Valores de deformación del extensómetro B-EA-15

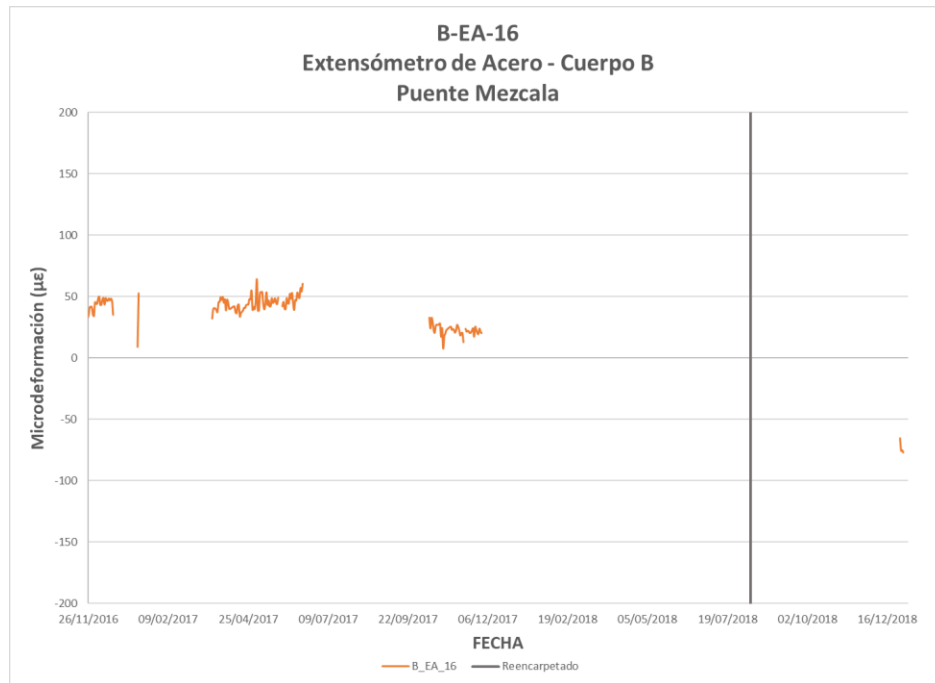


Figura 3.32 Valores de deformación del extensómetro B-EA-16

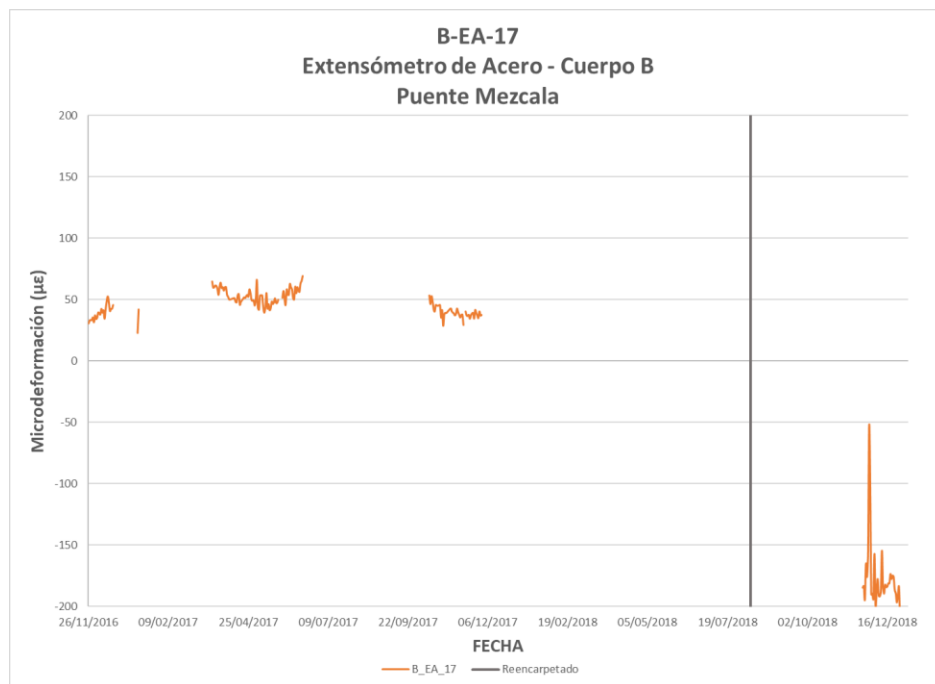


Figura 3.33 Valores de deformación del extensómetro B-EA-17

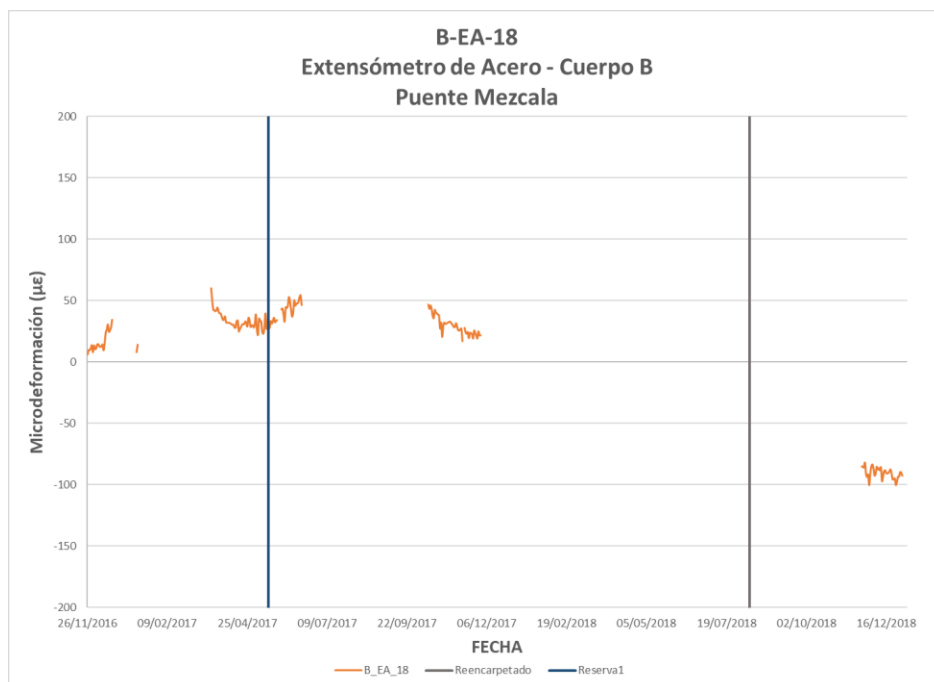


Figura 3.34 Valores de deformación del extensómetro B-EA-18

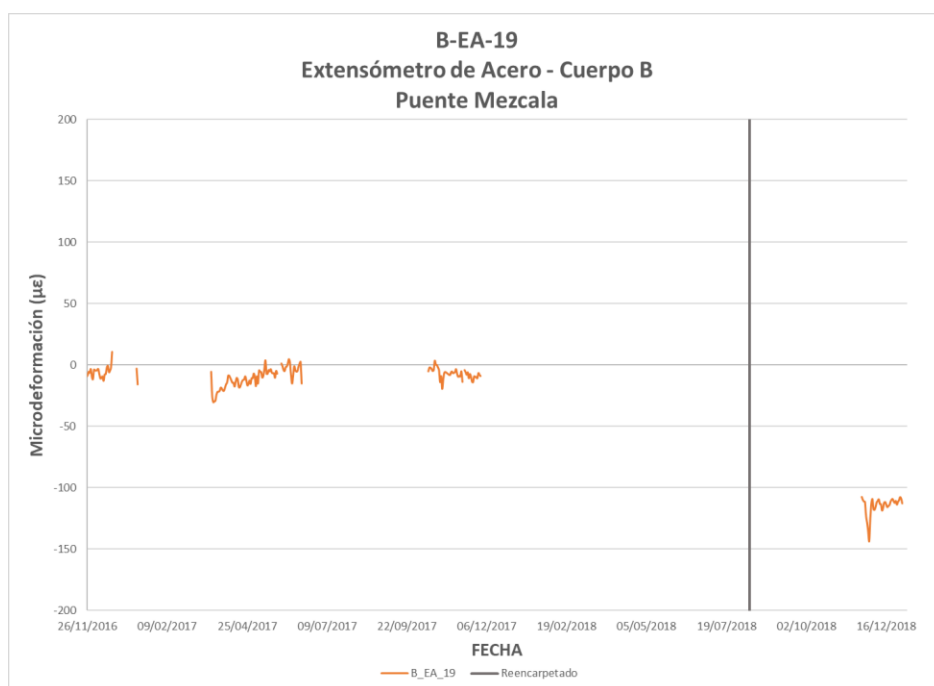


Figura 3.35 Valores de deformación del extensómetro B-EA-19

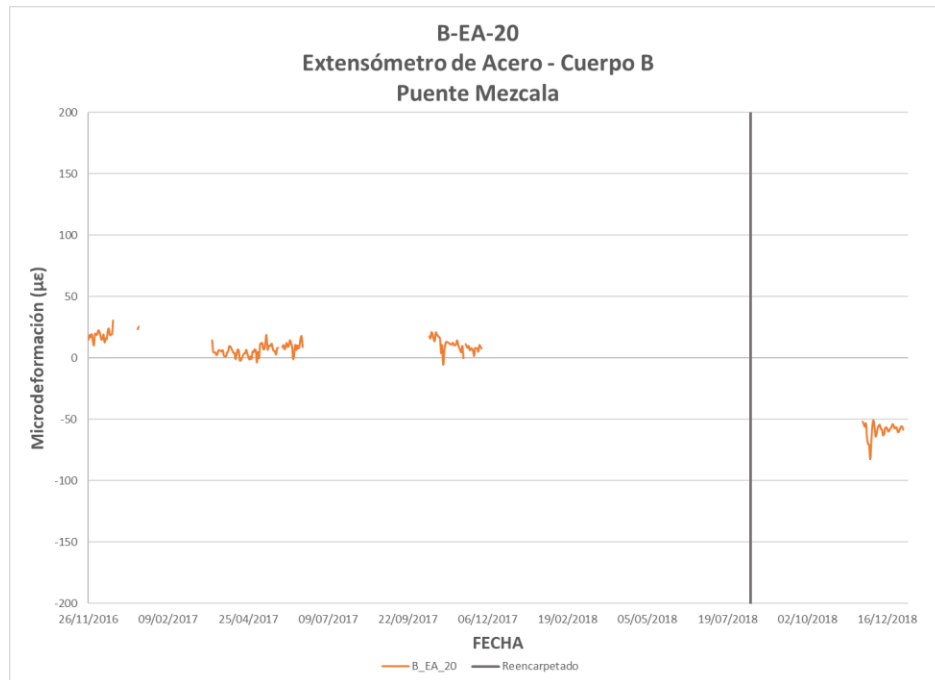


Figura 3.36 Valores de deformación del extensómetro B-EA-20

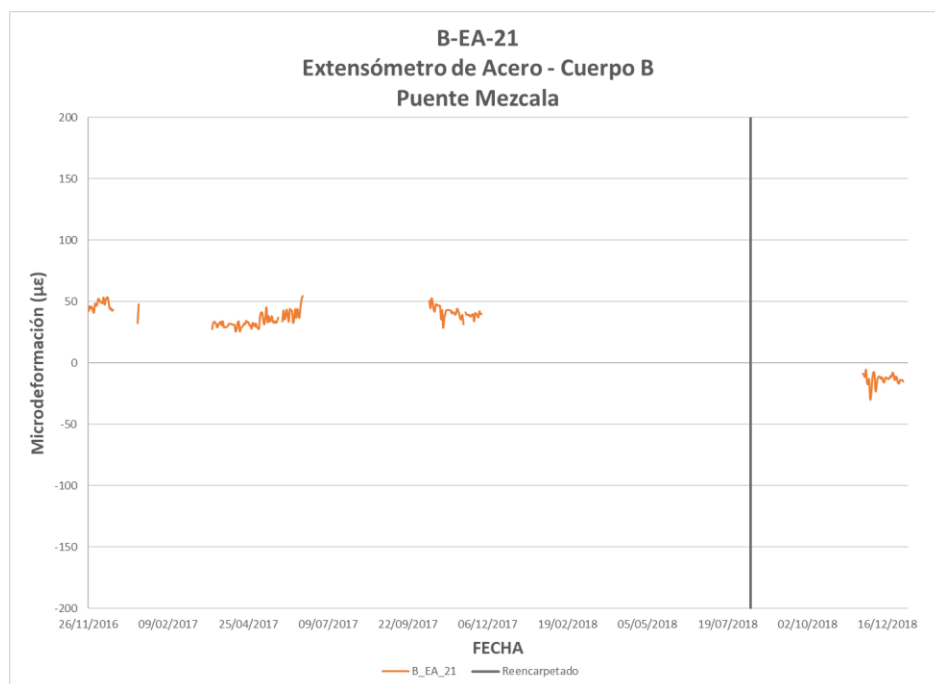


Figura 3.37 Valores de deformación del extensómetro B-EA-21

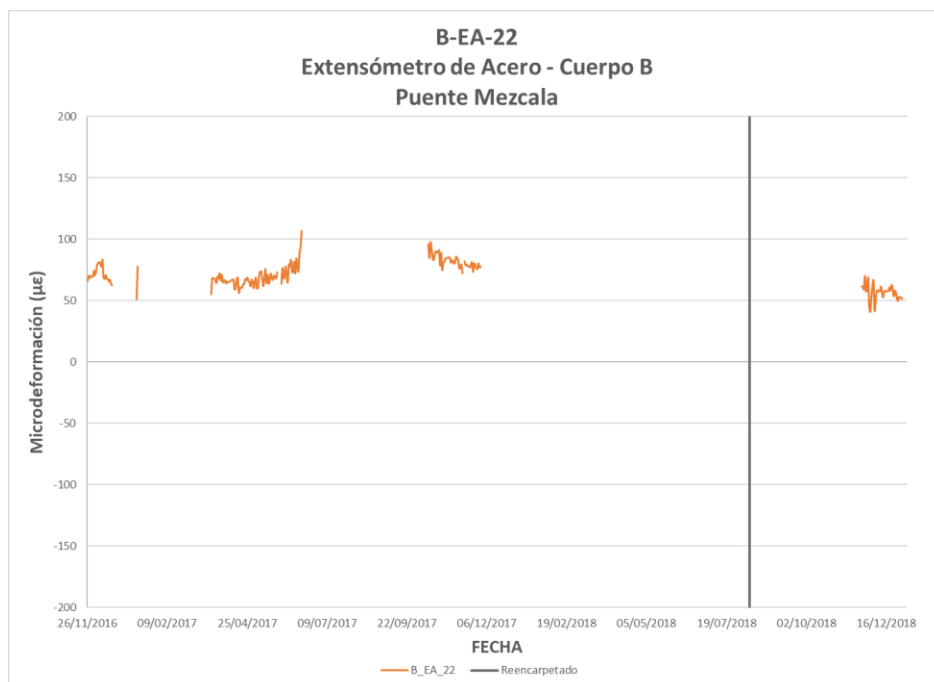


Figura 3.38 Valores de deformación del extensómetro B-EA-22

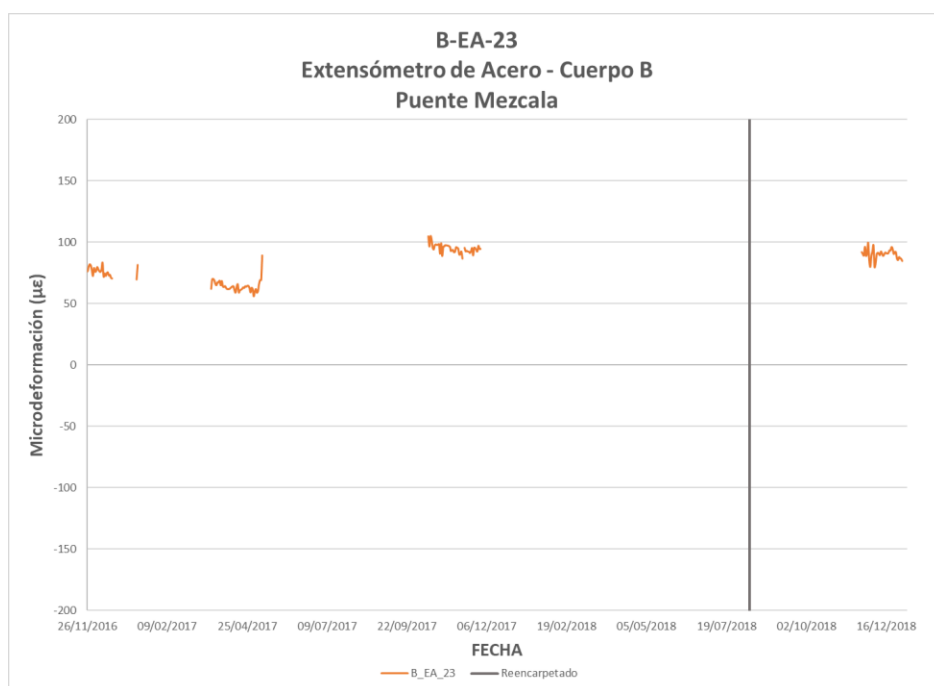


Figura 3.39 Valores de deformación del extensómetro B-EA-23

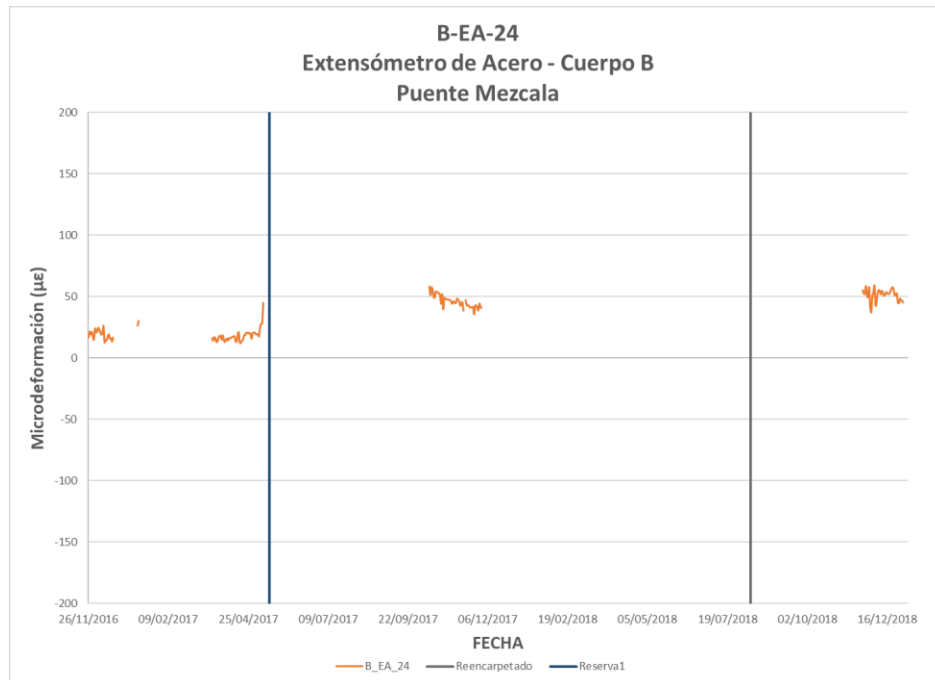


Figura 3.40 Valores de deformación del extensómetro B-EA-24

De la información del comportamiento de los sensores de deformación durante el año 2018, no se observan cambios significativos en su línea de referencia excepto por los sensores B-EA-9 y B-EA-19 que se ubican al centro del claro que comprenden las semi-arpas 10-11 y 8-9 respectivamente, por lo que es necesario inspeccionar la zona del puente y/o los sensores para determinar la razón de este cambio de deformación. En cuanto a la información del resto de sensores se puede concluir que el comportamiento estructural el puente es el esperado bajo condiciones de operación normal,

Las figuras 3.41 a 3.46 muestran la información de los inclinómetros instalados en el puente Mezcala.

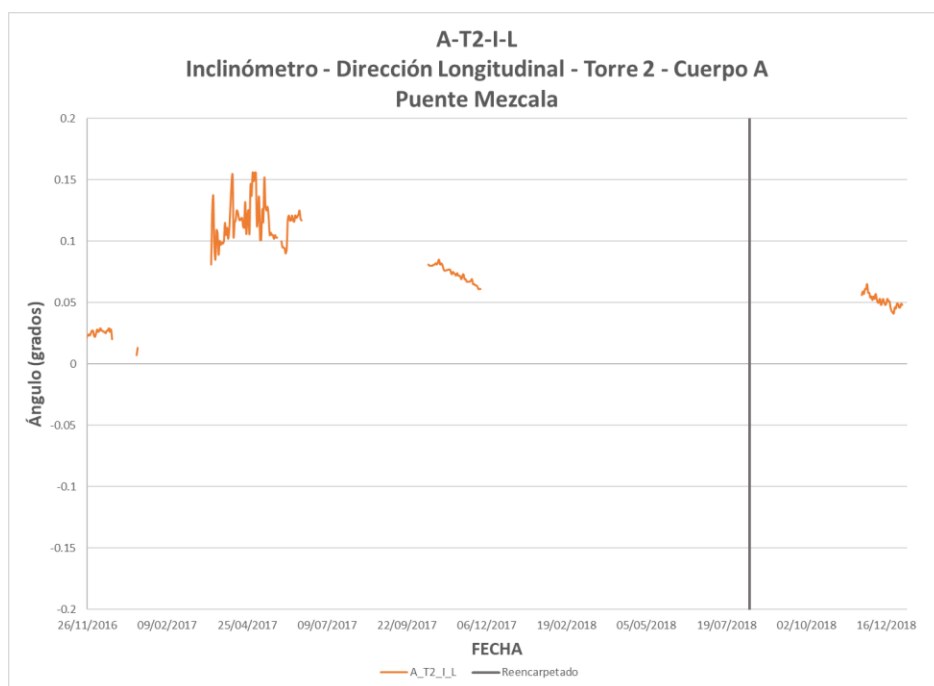


Figura 3.41 Valores de inclinación del inclinómetro A-T2-I-L

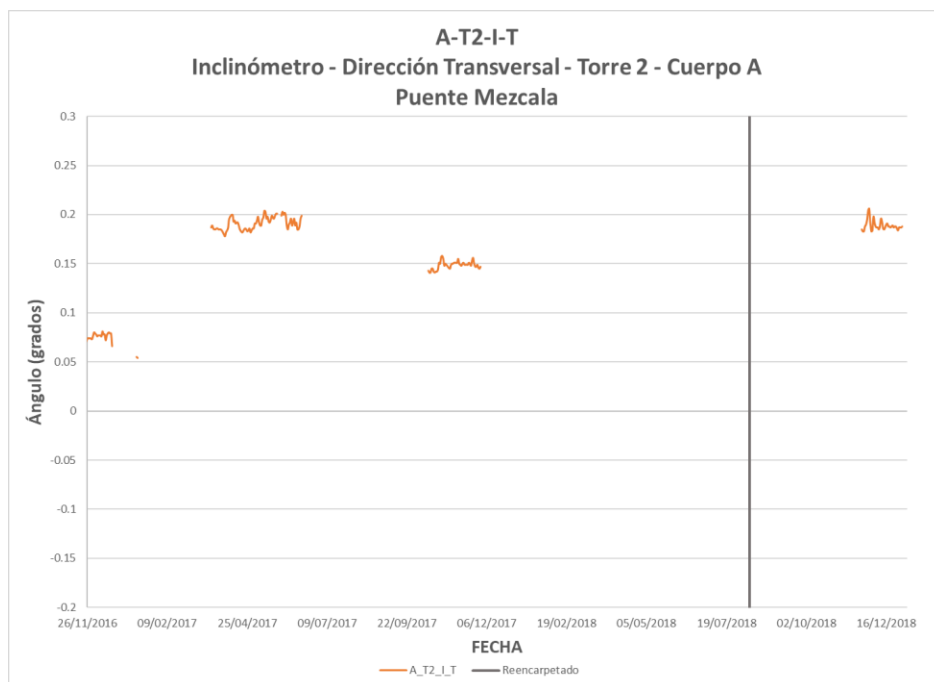


Figura 3.42 Valores de inclinación del inclinómetro A-T2-I-T

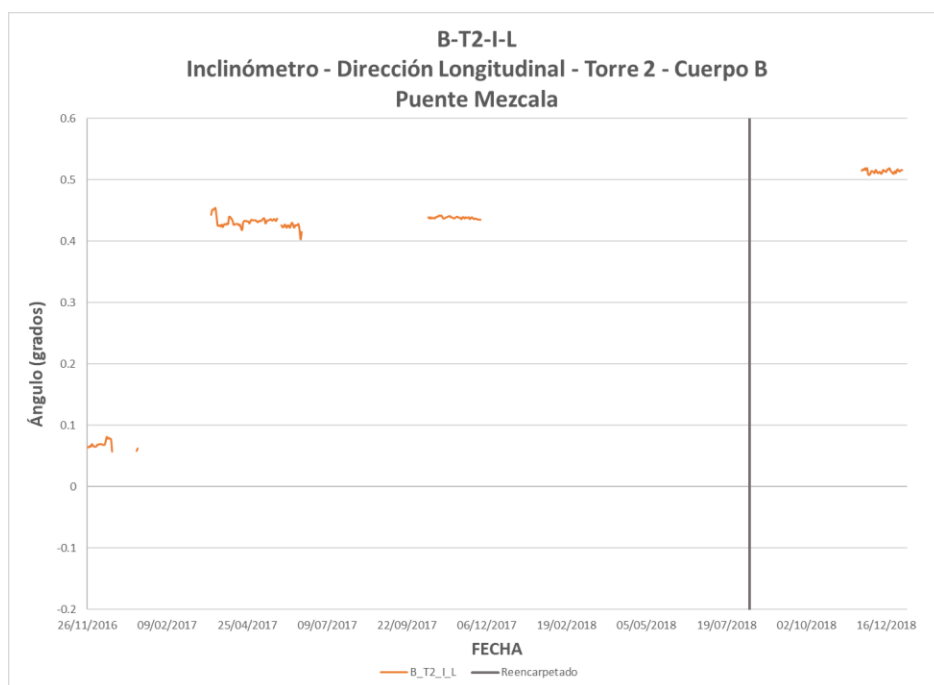


Figura 3.43 Valores de inclinación del inclinómetro B-T2-I-L

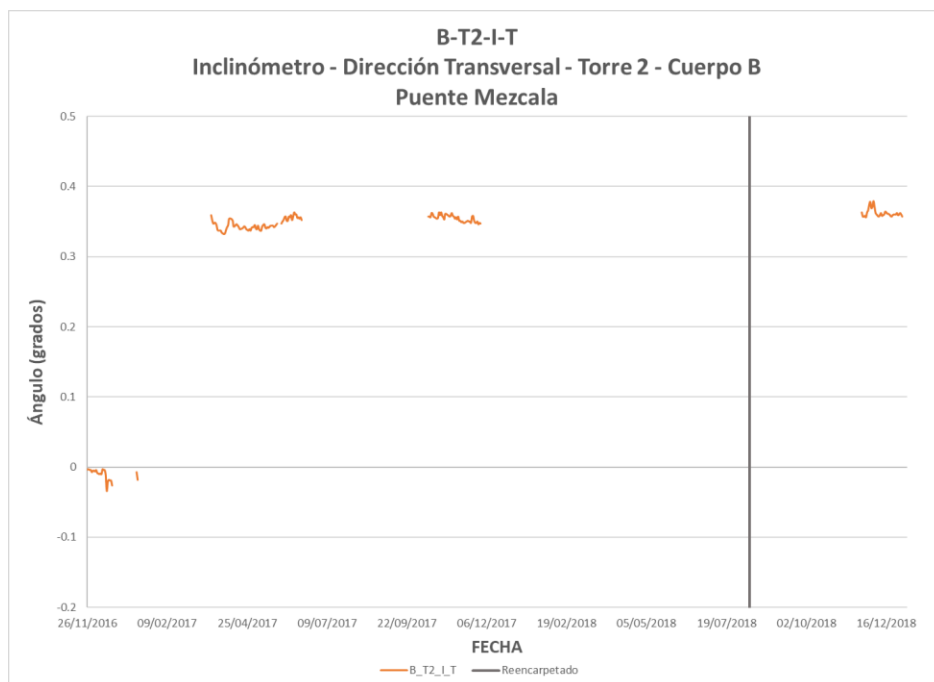


Figura 3.44 Valores de inclinación del inclinómetro B-T2-I-T

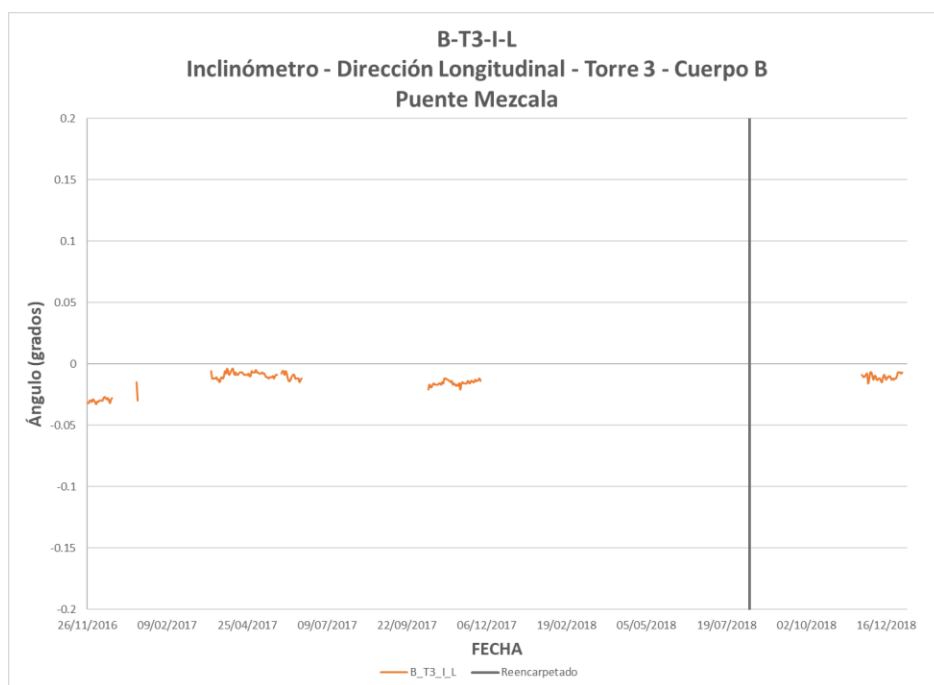


Figura 3.45 Valores de inclinación del inclinómetro B-T3-I-L

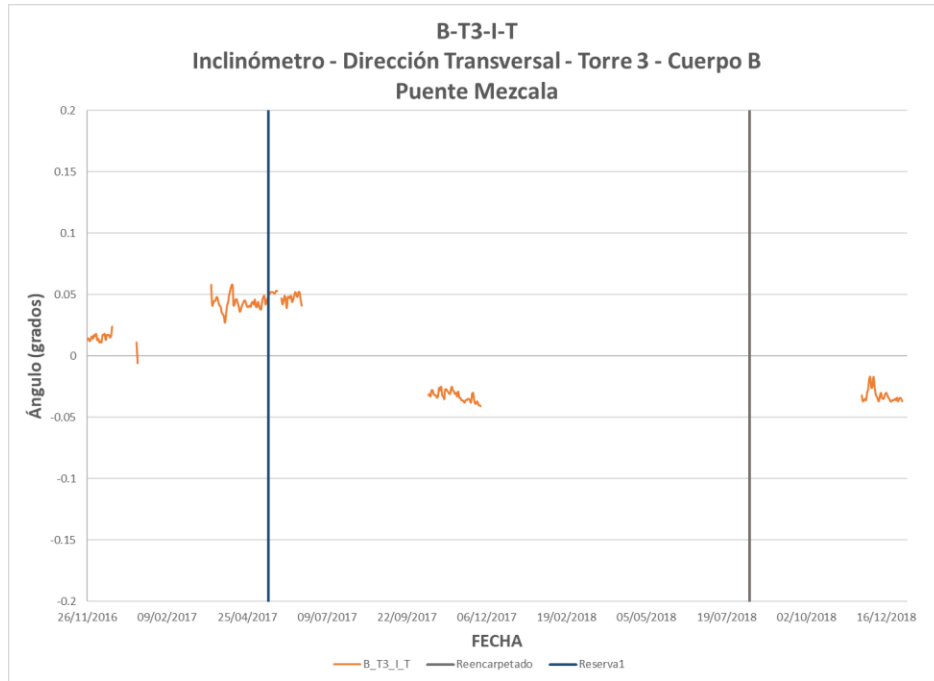


Figura 3.46 Valores de inclinación del inclinómetro B-T3-I-T

En las figuras 3.47 a 3.59, se muestran las gráficas de los valores de la media estadística de las tensiones calculadas en periodos de 15 días, con mediciones de tres minutos cada una. Cabe aclarar que, para cada tirante, el análisis se hace según el tipo de distribución que mejor ajusta en cada caso; por lo tanto, las distribuciones estadísticas pueden ser distintas para cada tirante, pero el valor reportado corresponde a la media de esas distribuciones.

Las tensiones de los tirantes son obtenidas mediante el método lineal indirecto, al monitorear las frecuencias naturales del tirante y conociendo sus parámetros constantes como longitud y masa total es posible monitorear su tensión en tiempo real.

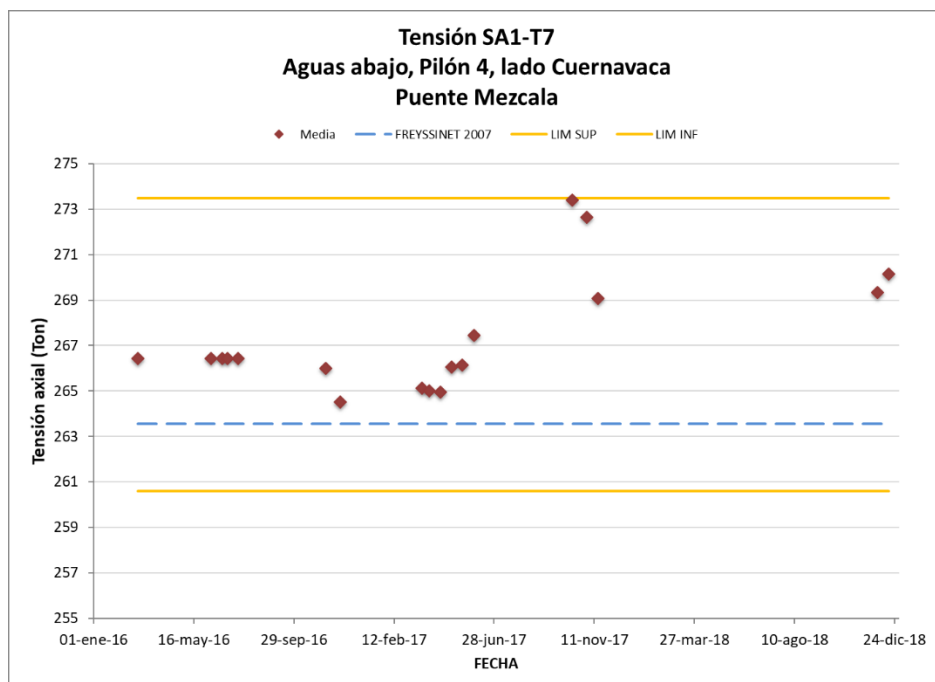


Figura 3.47 Tensión del tirante 7 de la semi arpa 1

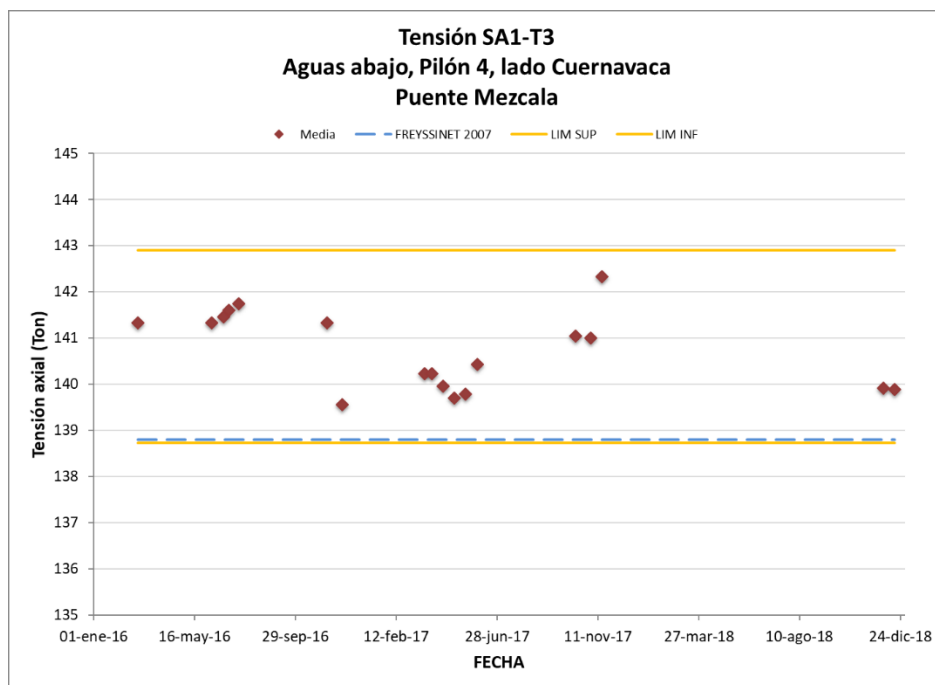


Figura 3.48 Tensión del tirante 3 de la semi arpa 1

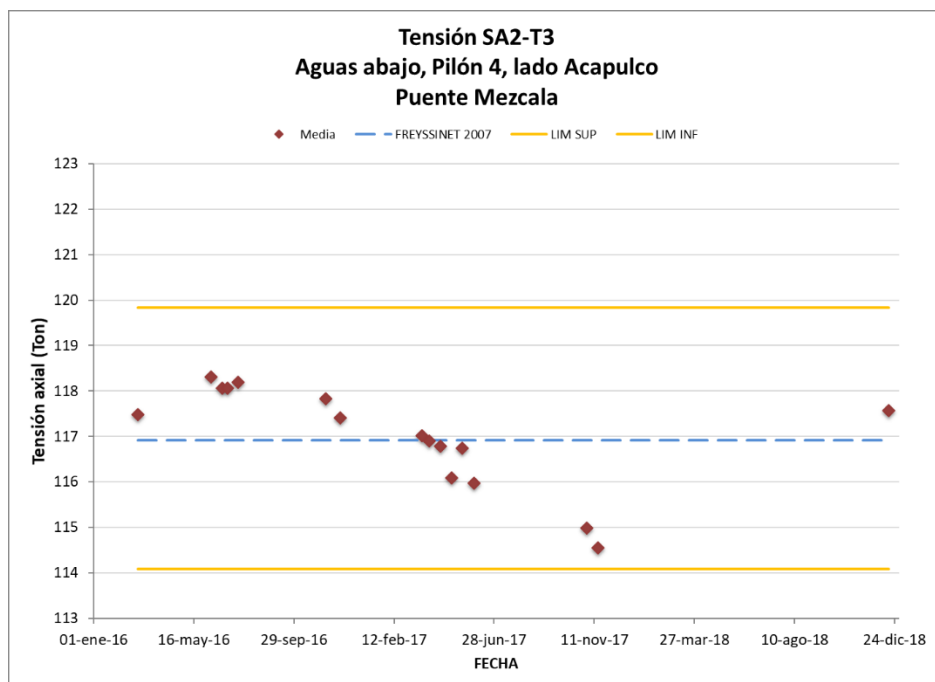


Figura 3.49 Tensión del tirante 3 de la semi arpa 2

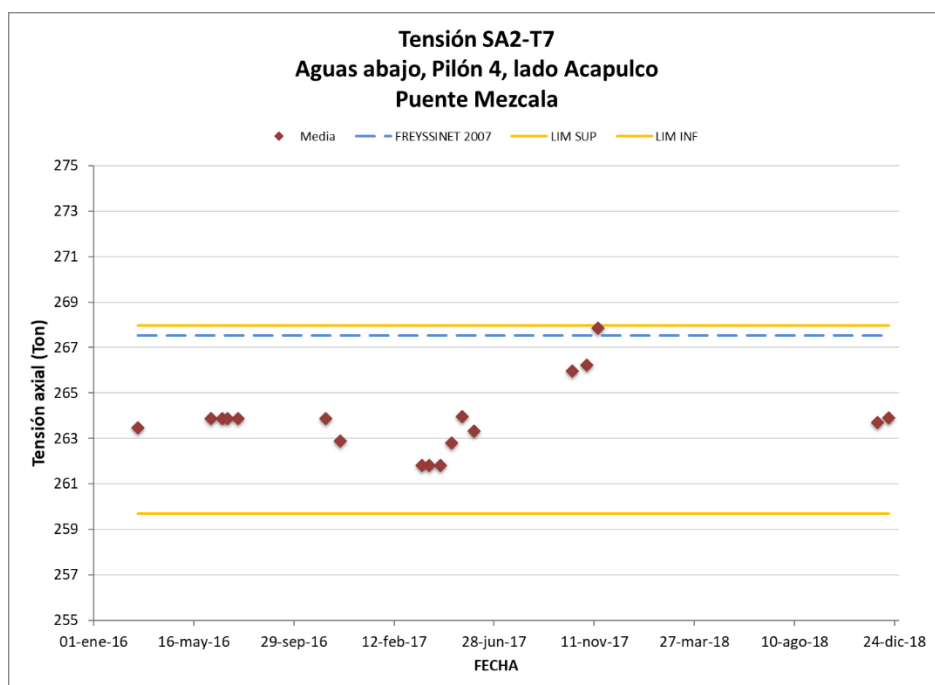


Figura 3.50 Tensión del tirante 7 de la semi arpa 2

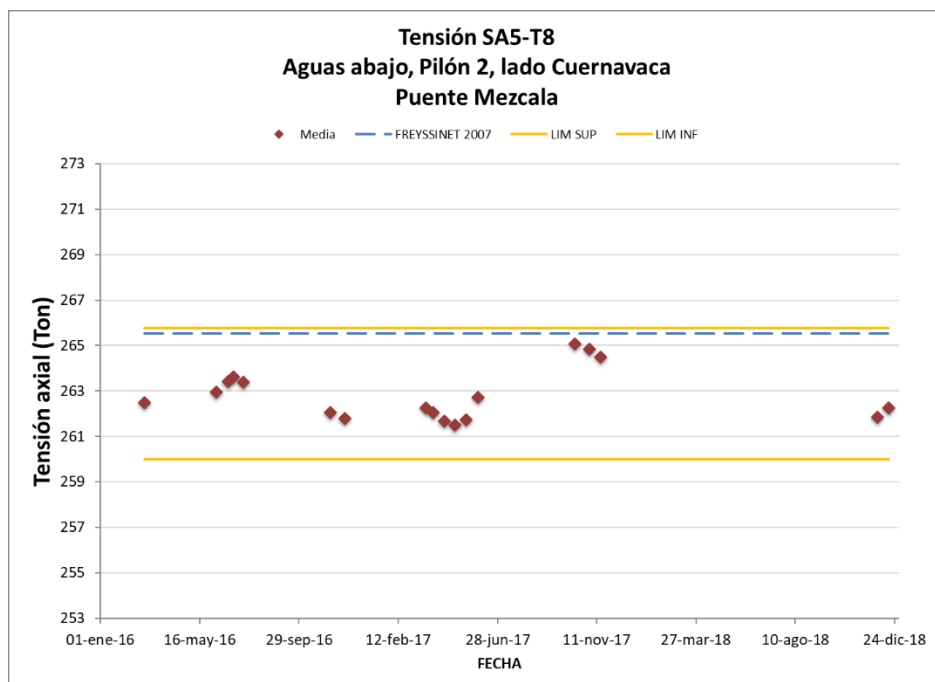


Figura 3.51 Tensión del tirante 8 de la semi arpa 5

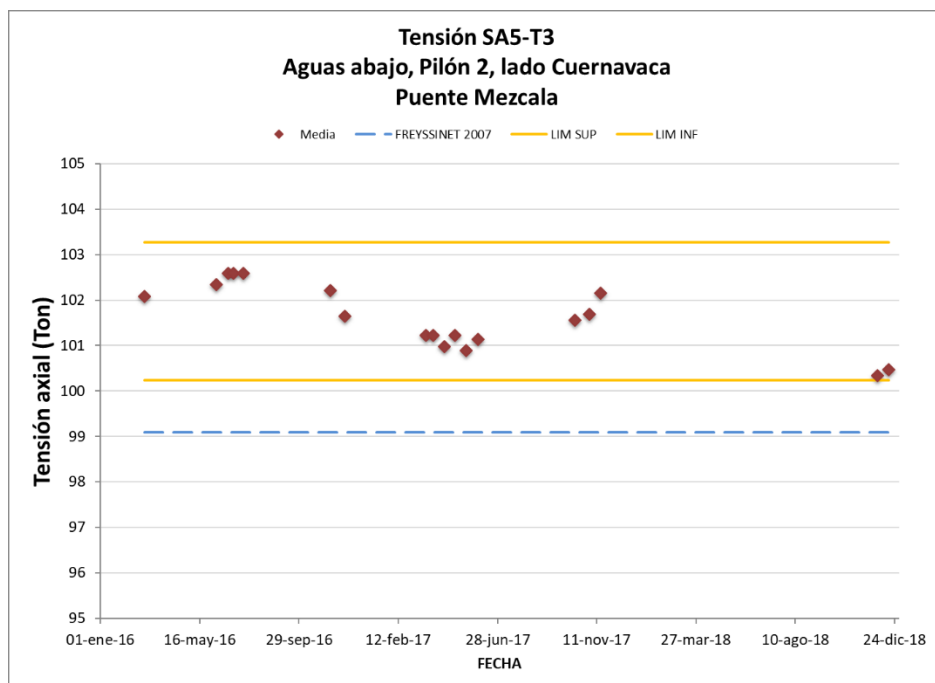


Figura 3.52 Tensión del tirante 3 de la semi arpa 5

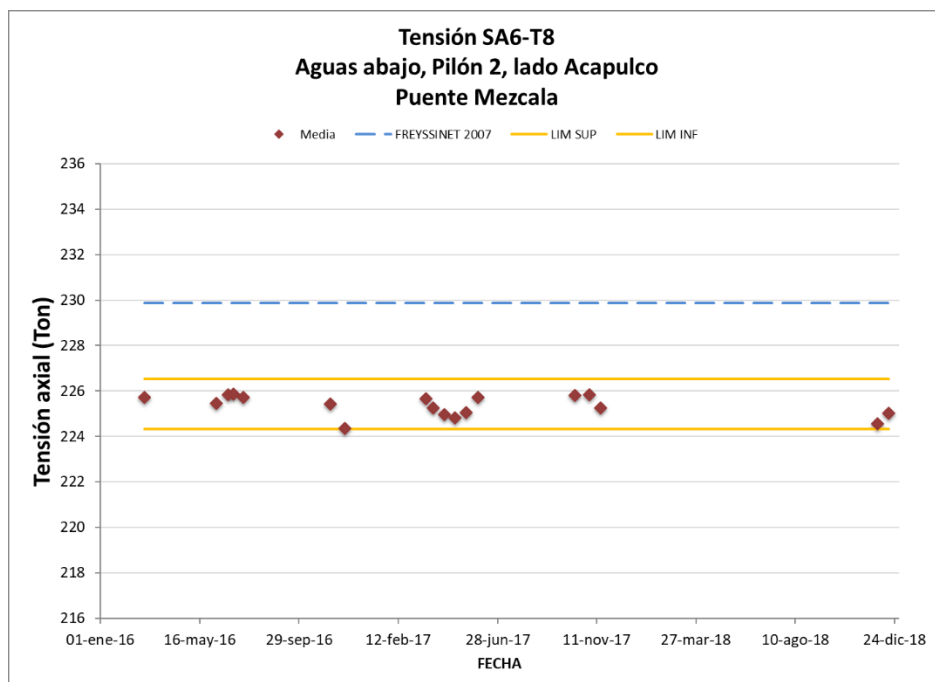


Figura 3.53 Tensión del tirante 8 de la semi arpa 6

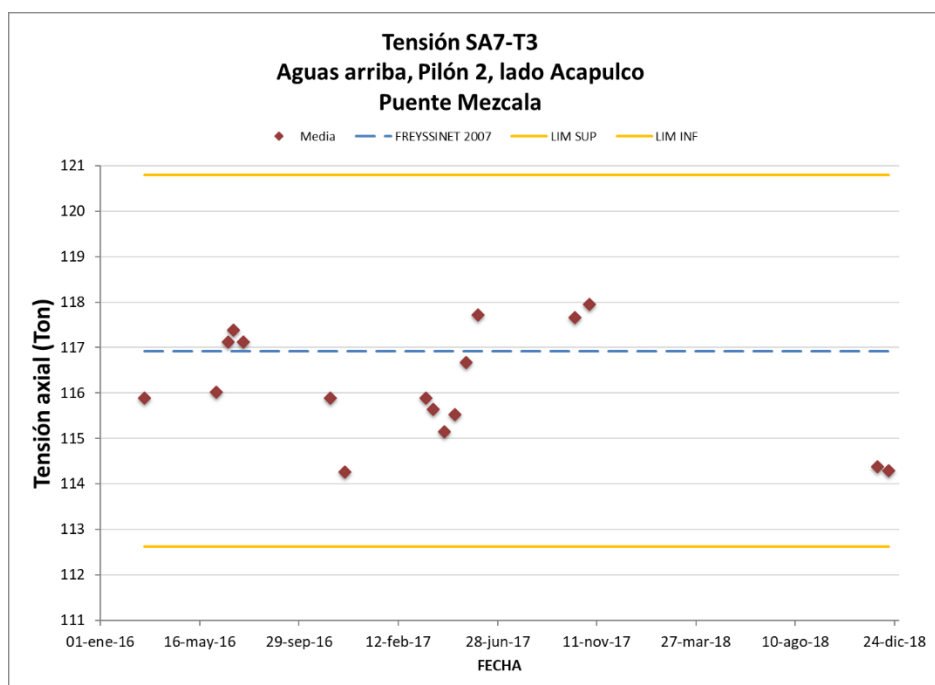


Figura 3.54 Tensión del tirante 3 de la semi arpa 7

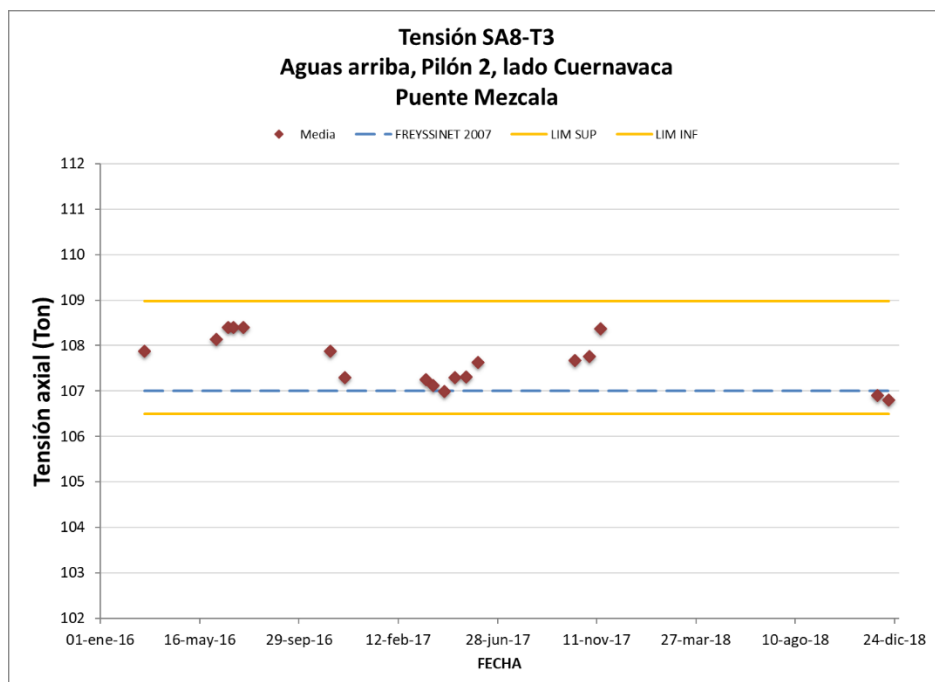


Figura 3.55 Tensión del tirante 3 de la semi arpa 8

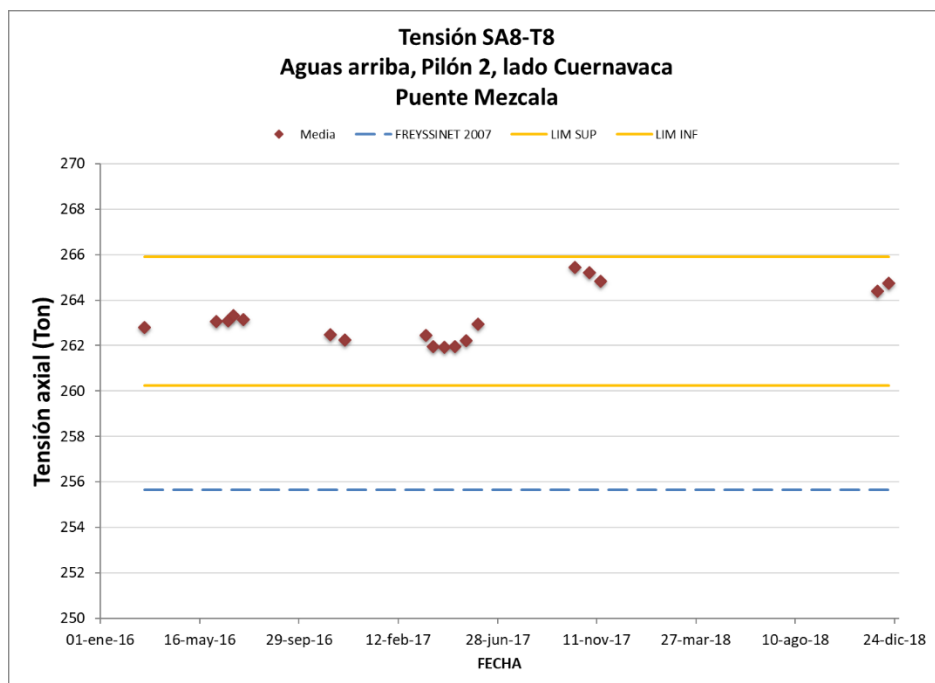


Figura 3.56 Tensión del tirante 8 de la semi arpa 8

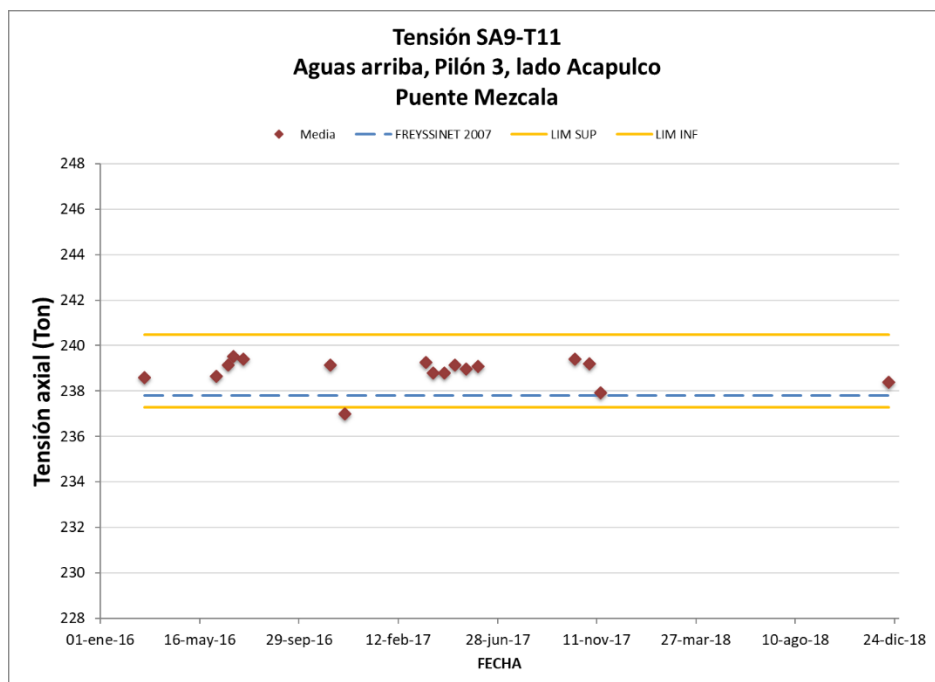


Figura 3.57 Tensión del tirante 11 de la semi arpa 9

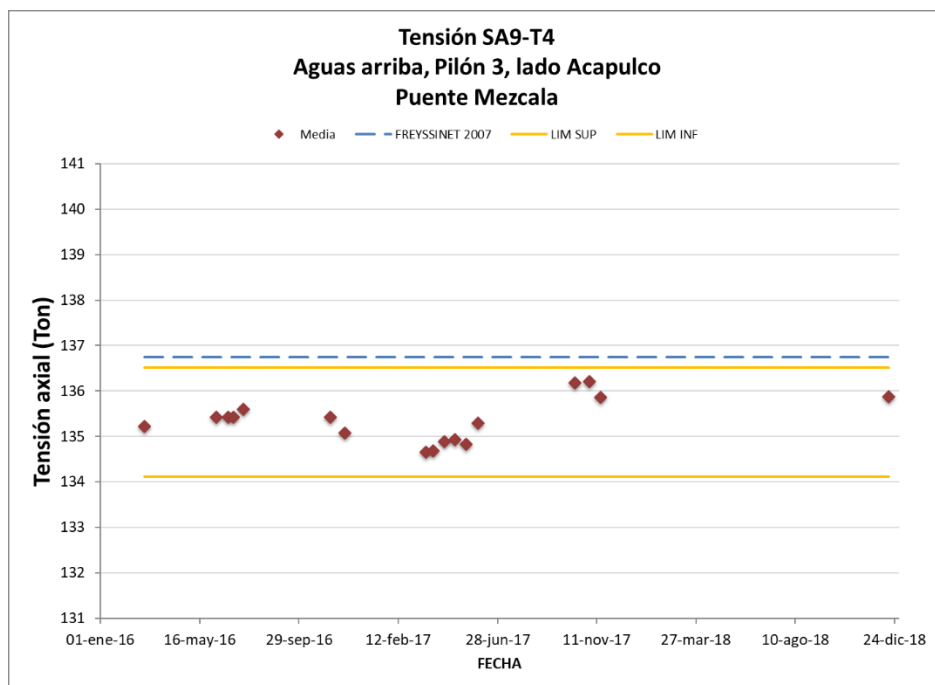


Figura 3.58 Tensión del tirante 4 de la semi arpa 9

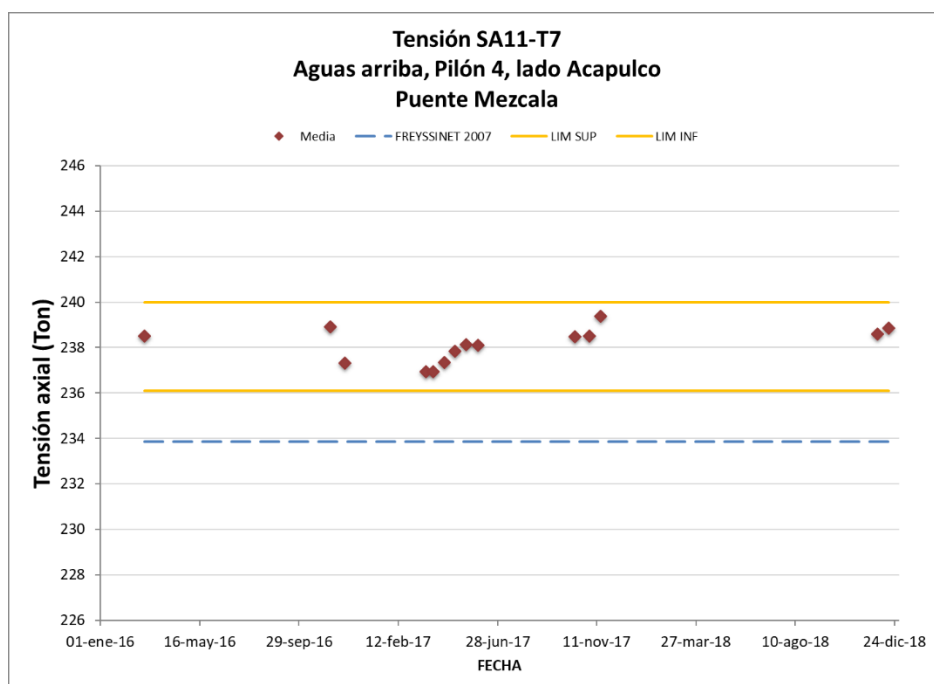


Figura 3.59 Tensión del tirante 7 de la semi arpa 11

Se puede concluir que los valores de las tensiones de los tirantes monitoreados se encuentran en el rango de variación aceptable tomando como referencia las tensiones obtenidas mediante pesajes directos con gatos hidráulicos realizados en 2007.

Otro de las variables a considerar durante el monitoreo estructural del puente Mezcala, es el valor de la media estadística de deformación unitaria provocada por las cargas vivas (vehículos que circulan por el puente Mezcala), el cual es un parámetro bastante sensible a los mantenimientos realizados y a los cierres parciales de cuerpos o carriles. Siempre que un vehículo circula sobre el puente se genera un esfuerzo sobre las vigas principales a tensión y después a compresión, el valor absoluto de estos registros, a tensión y compresión, es utilizado para construir una distribución estadística para cada sensor.

Las gráficas de las figuras de la 3.60 a la 3.139 muestran el valor de la media de cada sensor a tensión y compresión desde el año de 2016.

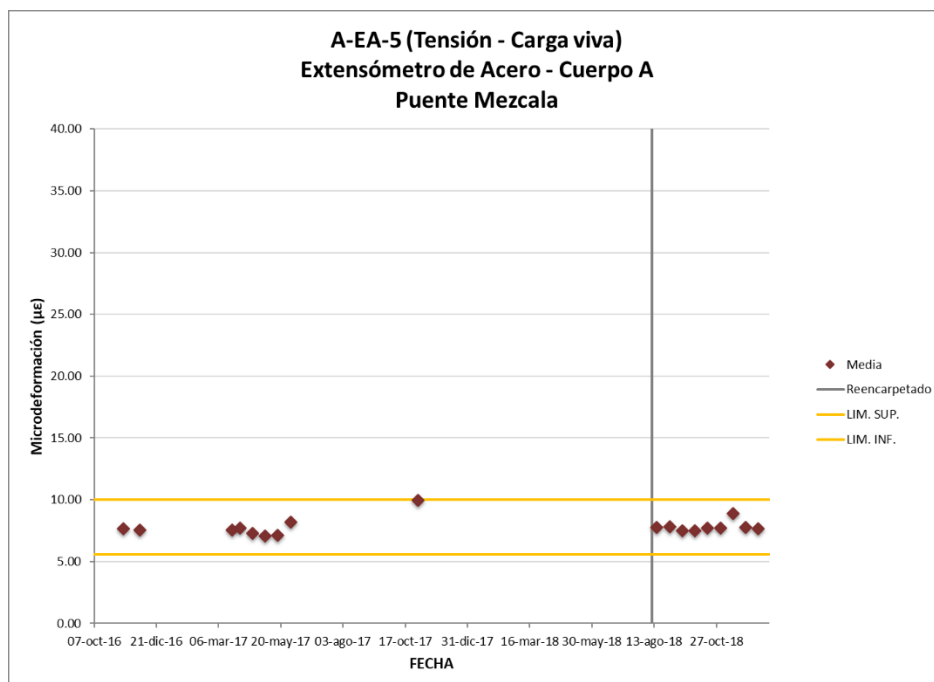


Figura 3.60 Media estadística del extensómetro A-EA-5 a tensión

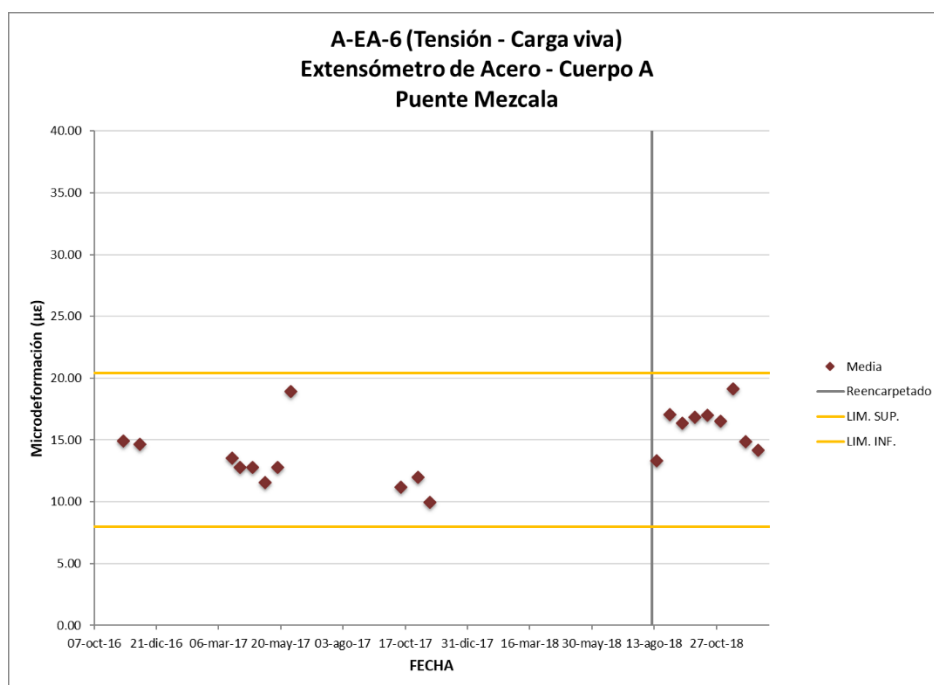


Figura 3.61 Media estadística del extensómetro A-EA-6 a tensión

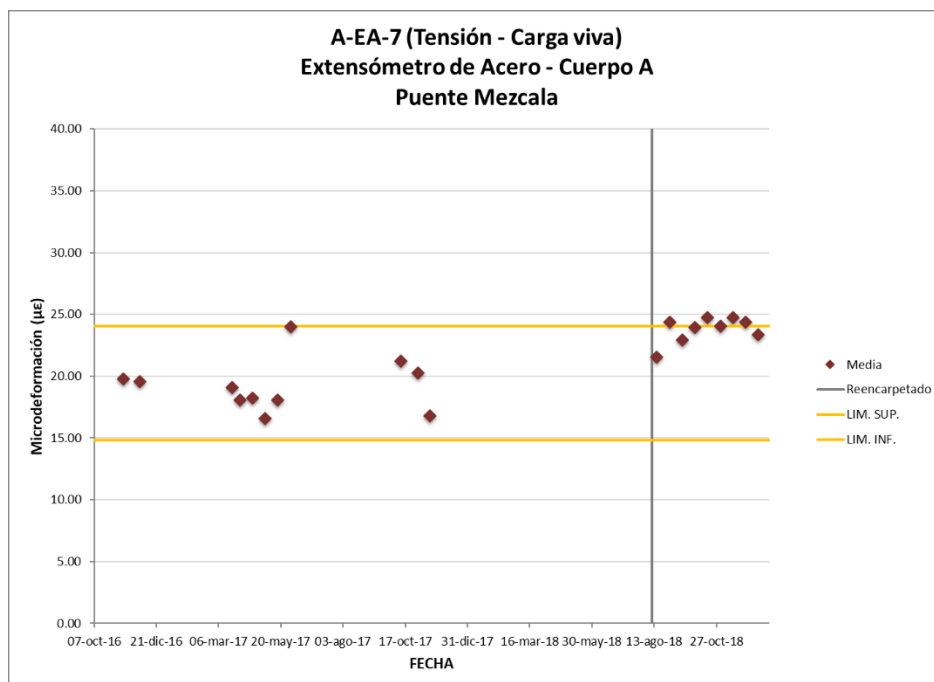


Figura 3.62 Media estadística del extensómetro A-EA-7 a tensión

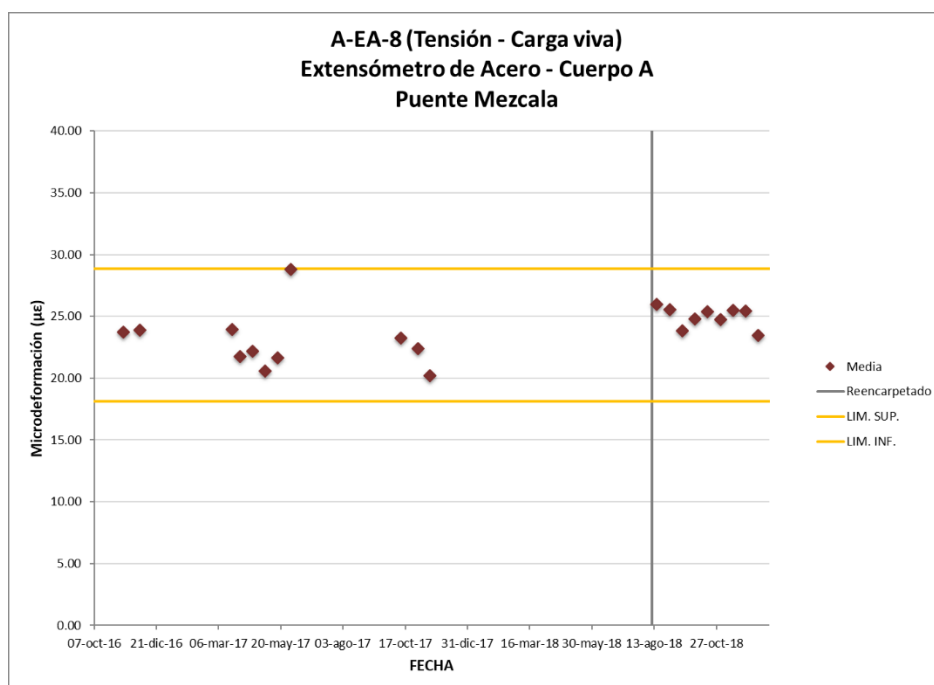


Figura 3.63 Media estadística del extensómetro A-EA-8 a tensión

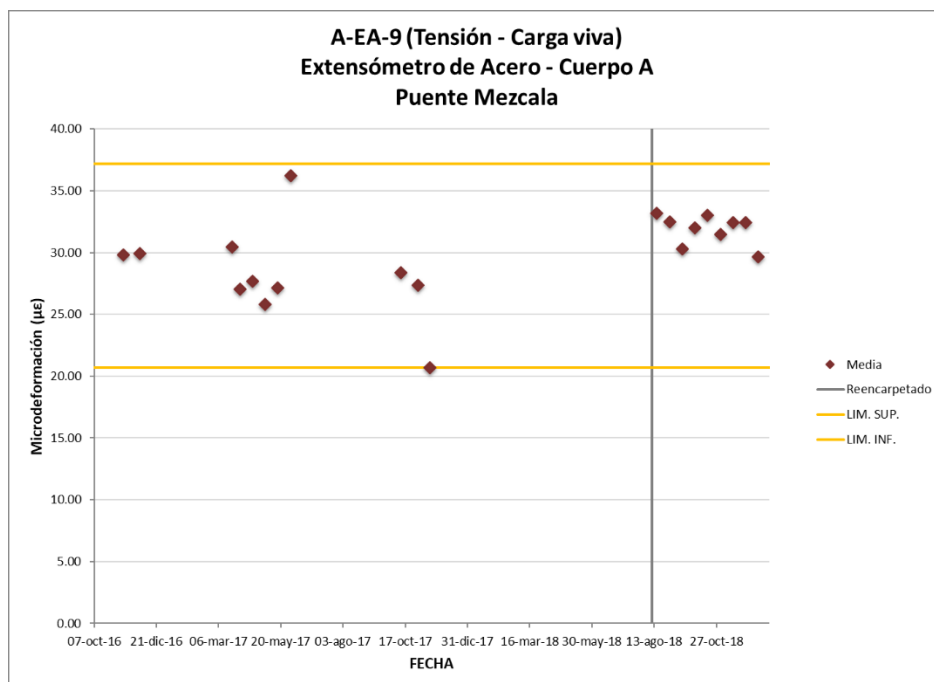


Figura 3.64 Media estadística del extensómetro A-EA-9 a tensión

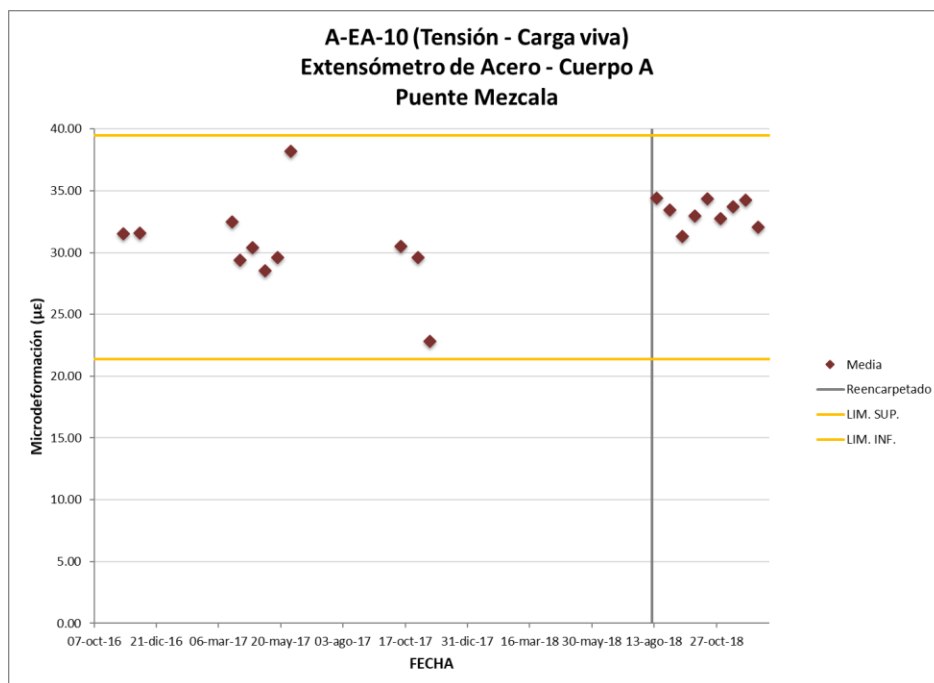


Figura 3.65 Media estadística del extensómetro A-EA-10 a tensión

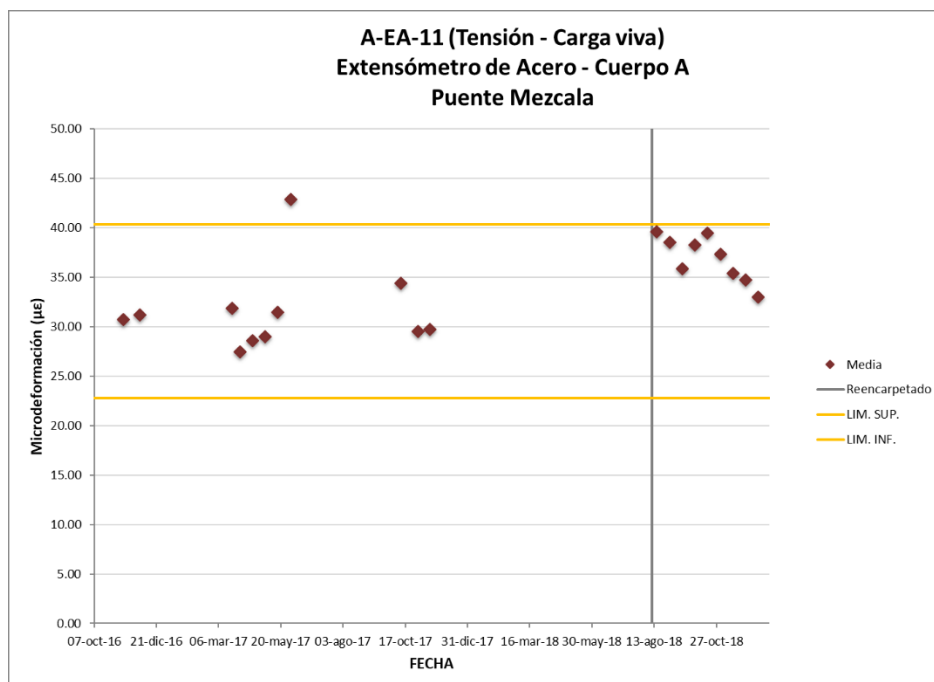


Figura 3.66 Media estadística del extensómetro A-EA-11 a tensión

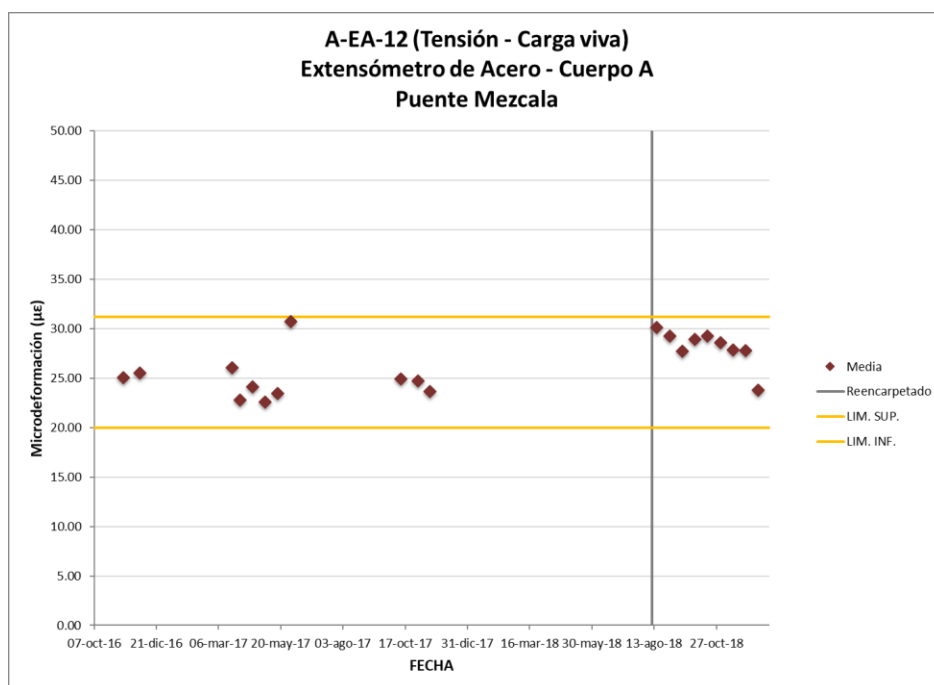


Figura 3.67 Media estadística del extensómetro A-EA-12 a tensión

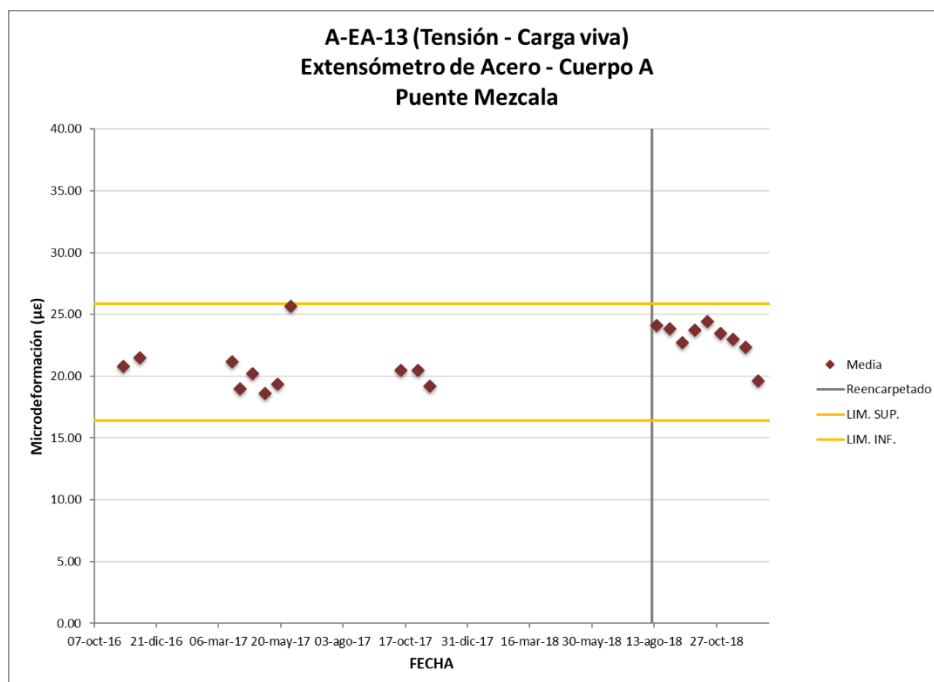


Figura 3.68 Media estadística del extensómetro A-EA-13 a tensión

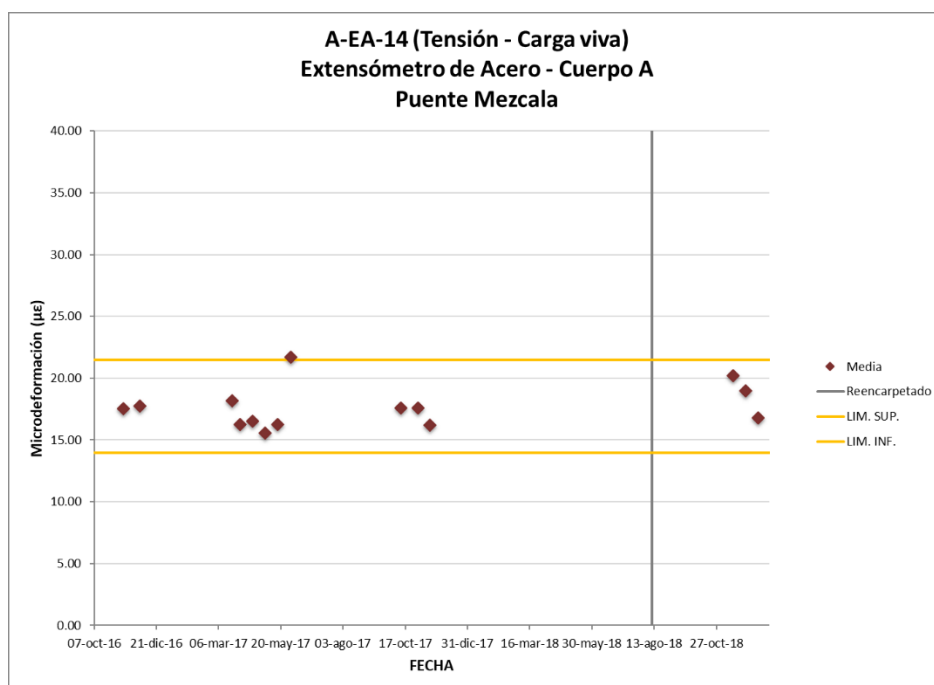


Figura 3.69 Media estadística del extensómetro A-EA-14 a tensión

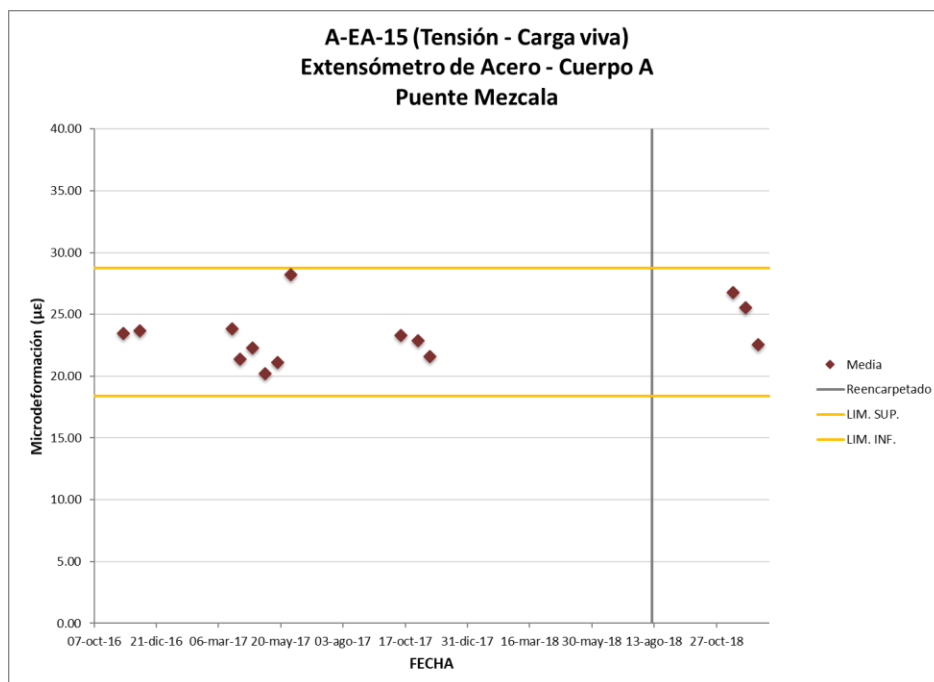


Figura 3.70 Media estadística del extensómetro A-EA-15 a tensión

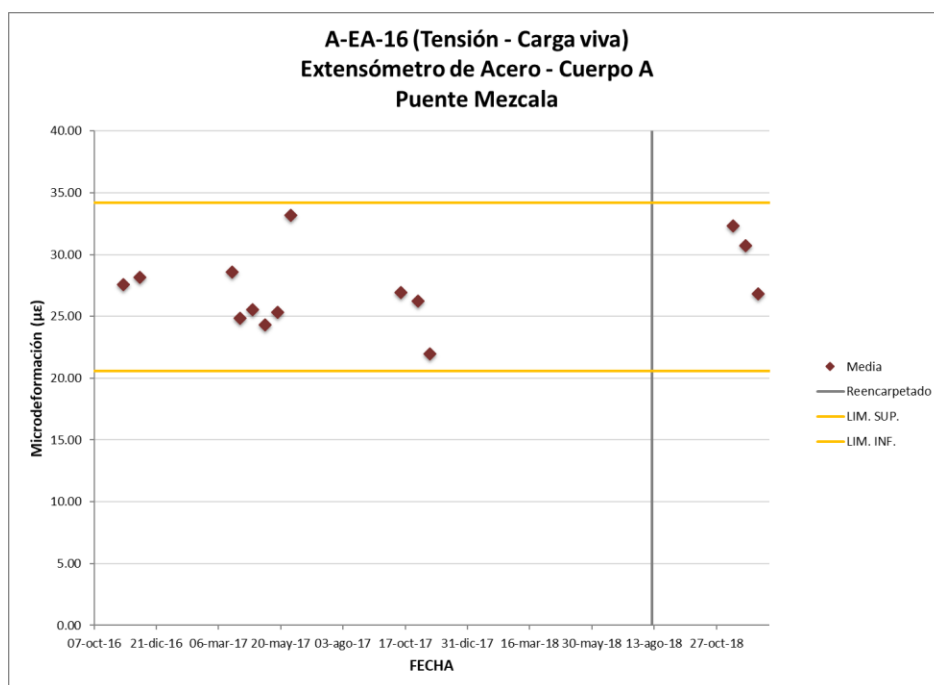


Figura 3.71 Media estadística del extensómetro A-EA-16 a tensión

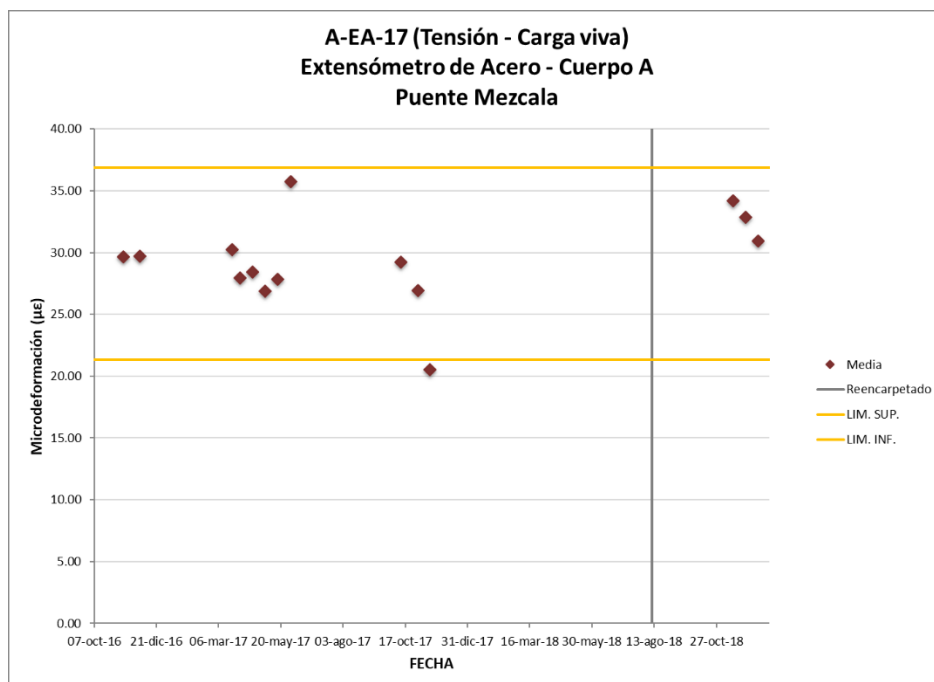


Figura 3.72 Media estadística del extensómetro A-EA-17 a tensión

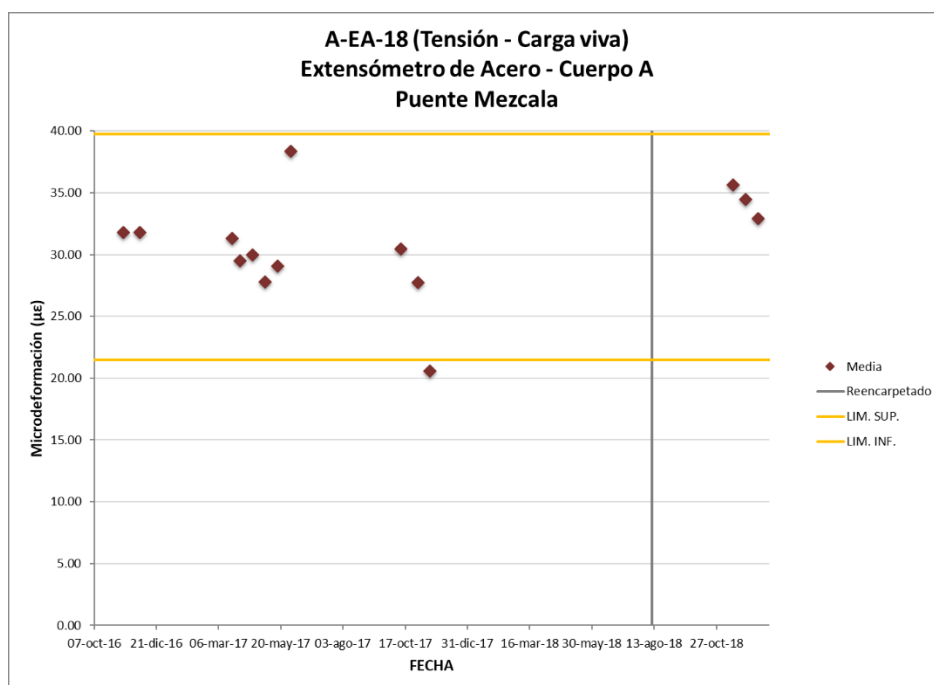


Figura 3.73 Media estadística del extensómetro A-EA-18 a tensión

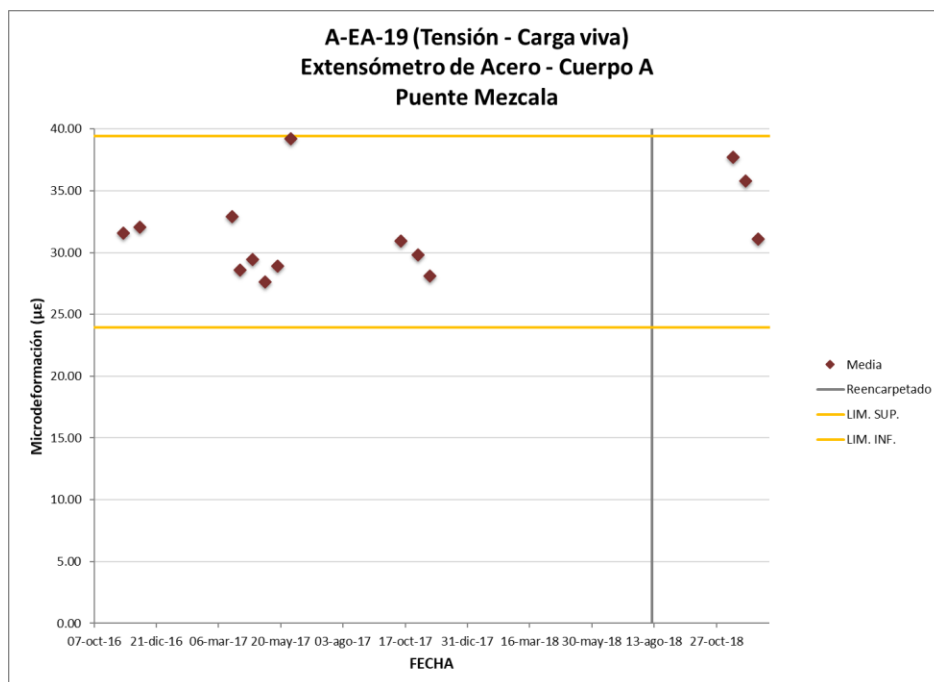


Figura 3.74 Media estadística del extensómetro A-EA-19 a tensión

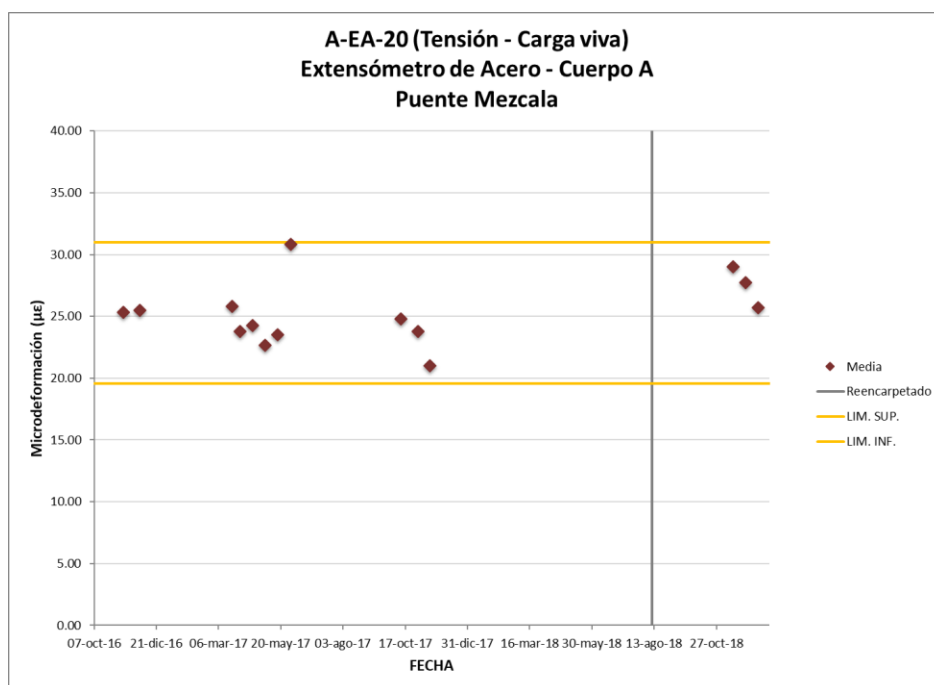


Figura 3.75 Media estadística del extensómetro A-EA-20 a tensión

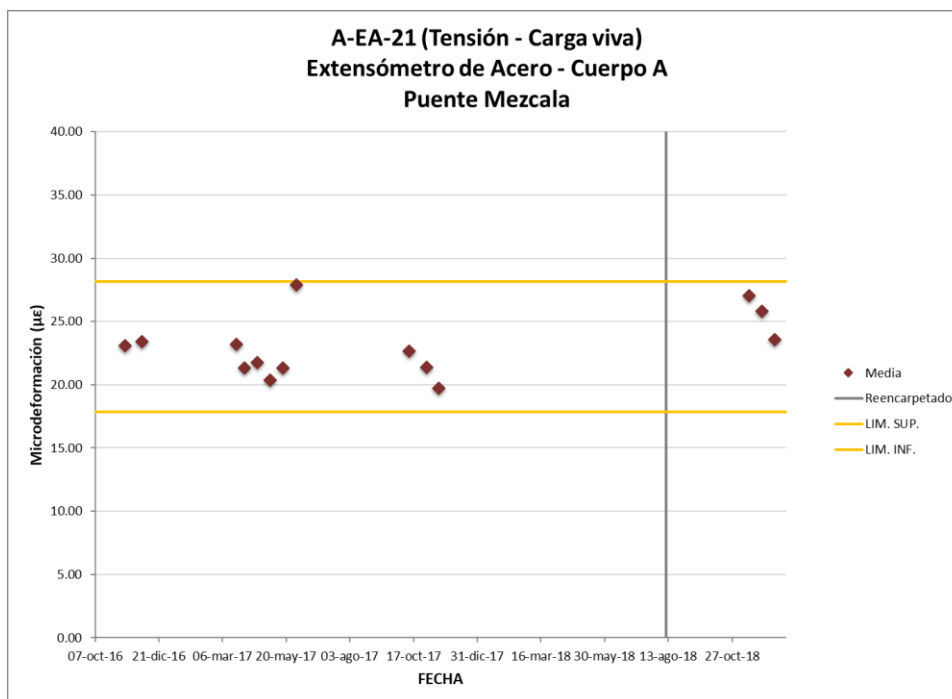


Figura 3.76 Media estadística del extensómetro A-EA-21 a tensión

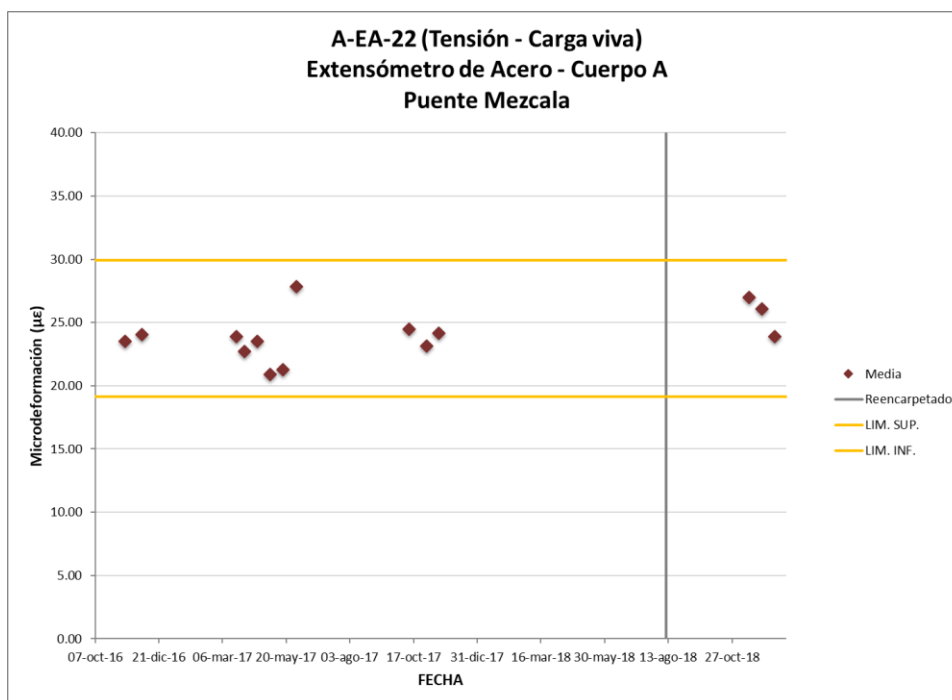


Figura 3.77 Media estadística del extensómetro A-EA-22 a tensión

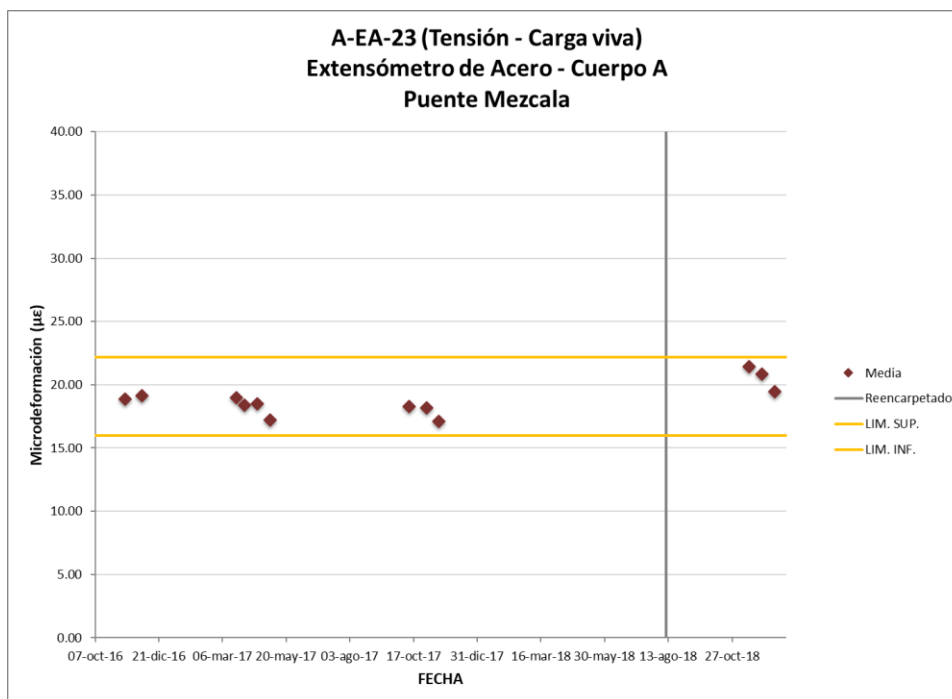


Figura 3.78 Media estadística del extensómetro A-EA-23 a tensión

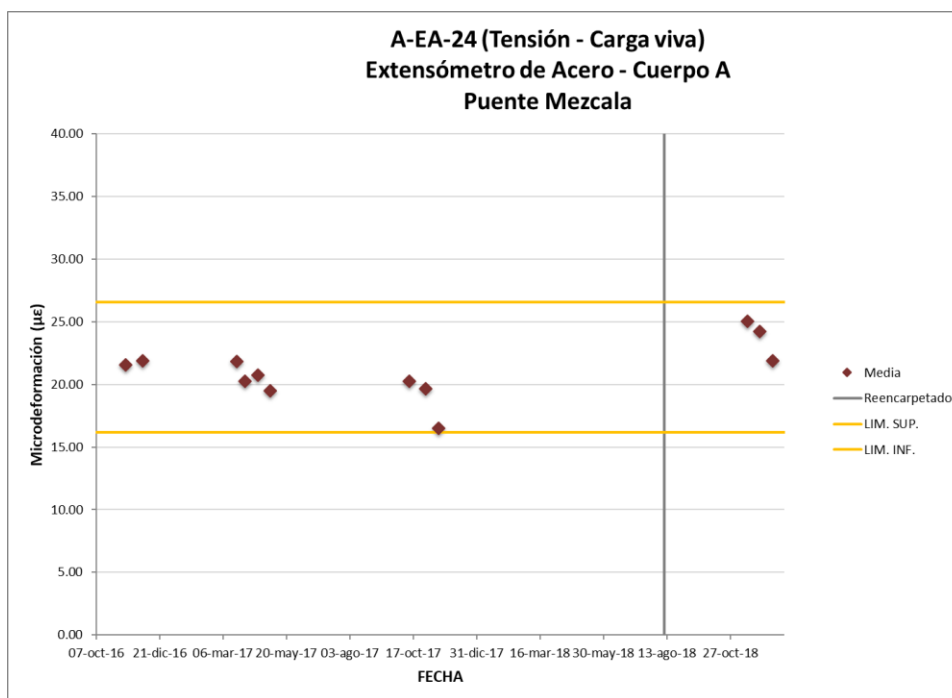


Figura 3.79 Media estadística del extensómetro A-EA-24 a tensión

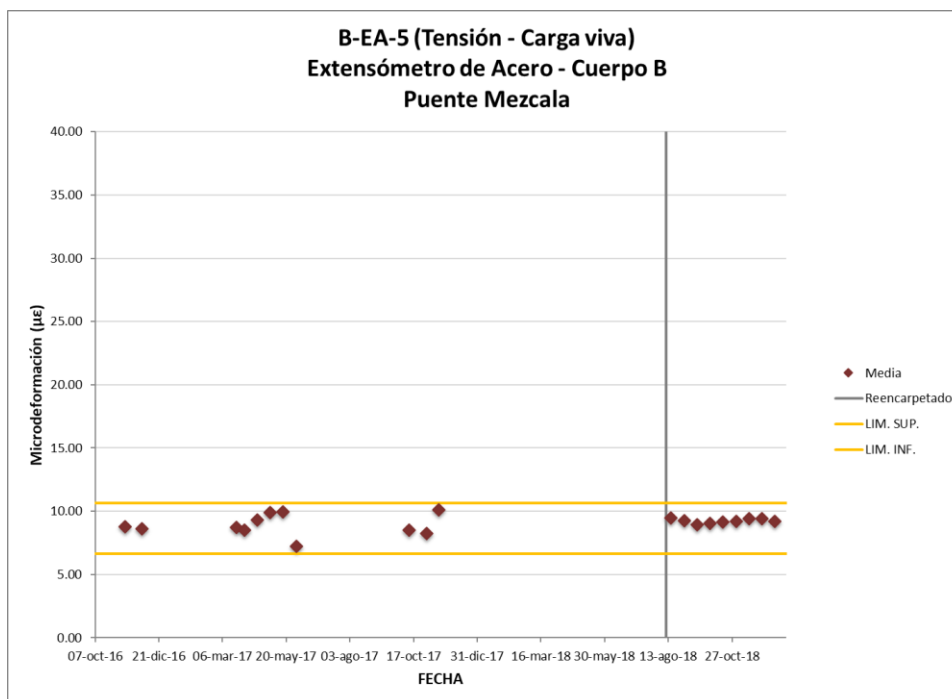


Figura 3.80 Media estadística del extensómetro B-EA-5 a tensión

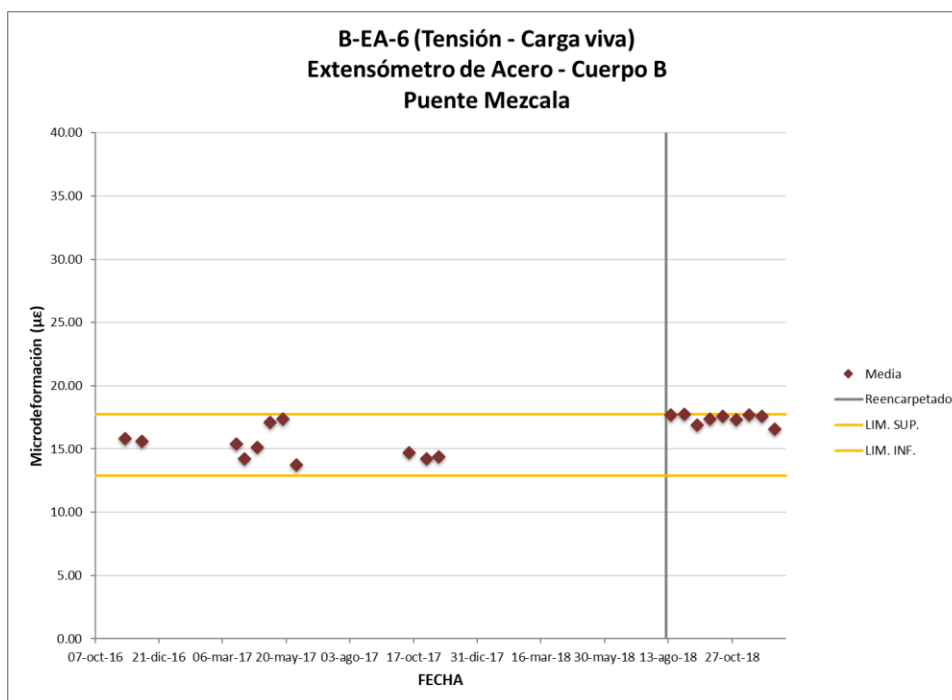


Figura 3.81 Media estadística del extensómetro B-EA-6 a tensión

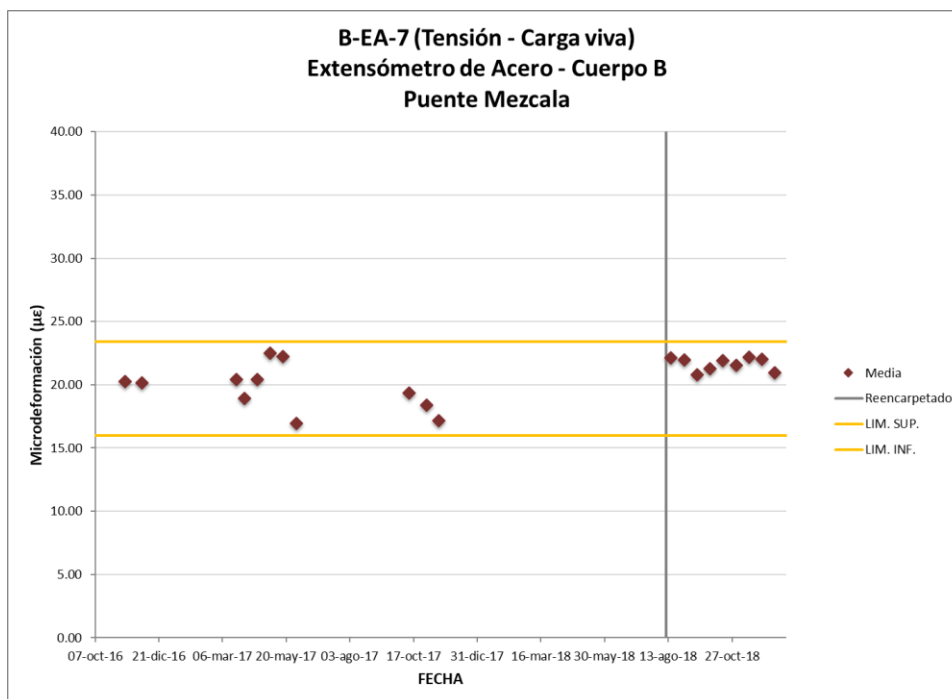


Figura 3.82 Media estadística del extensómetro B-EA-7 a tensión

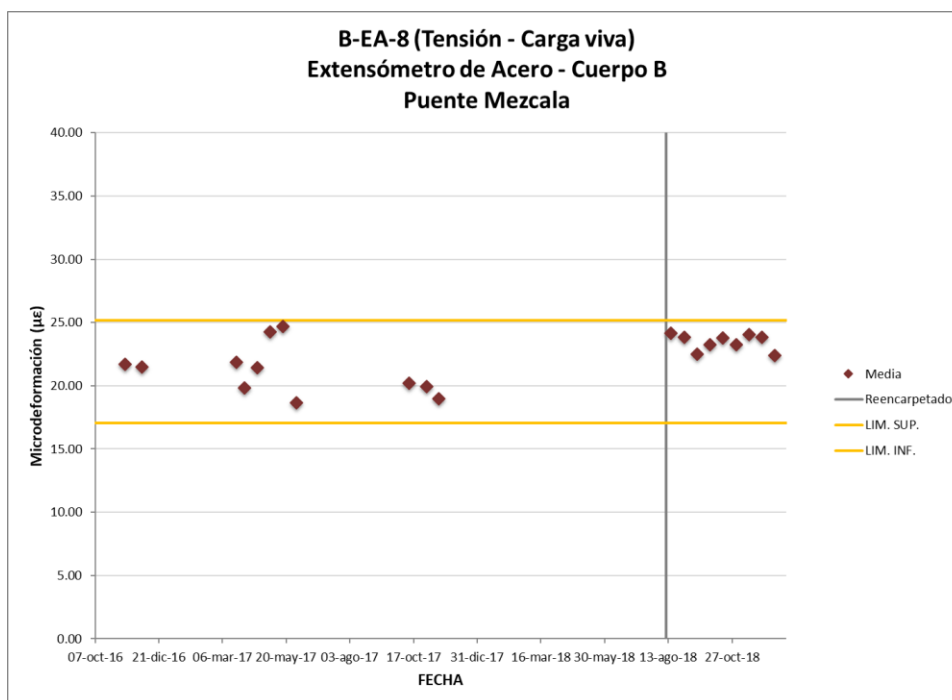


Figura 3.83 Media estadística del extensómetro B-EA-8 a tensión

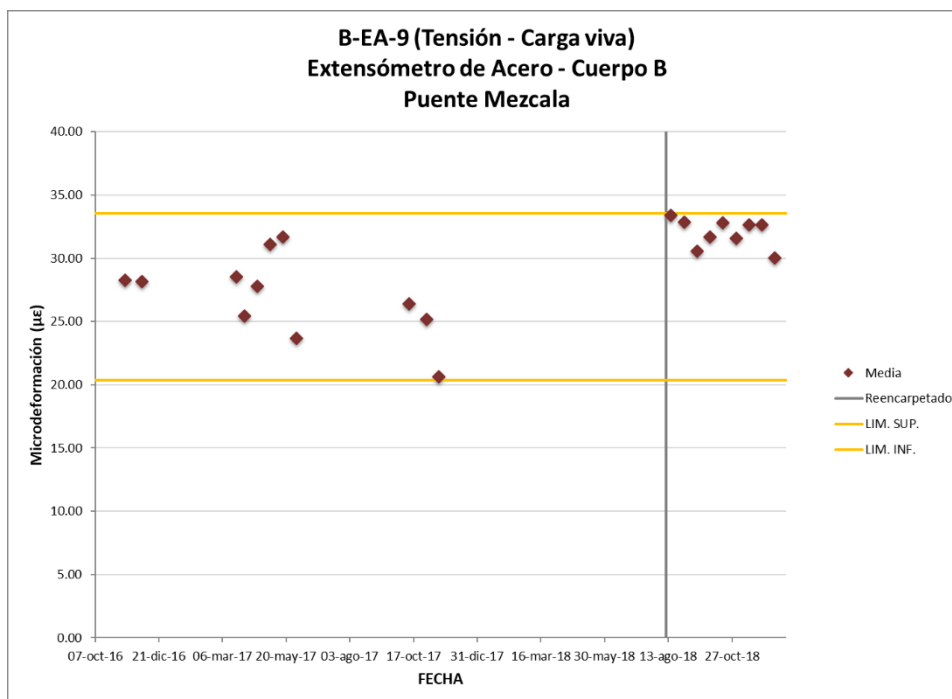


Figura 3.84 Media estadística del extensómetro B-EA-9 a tensión

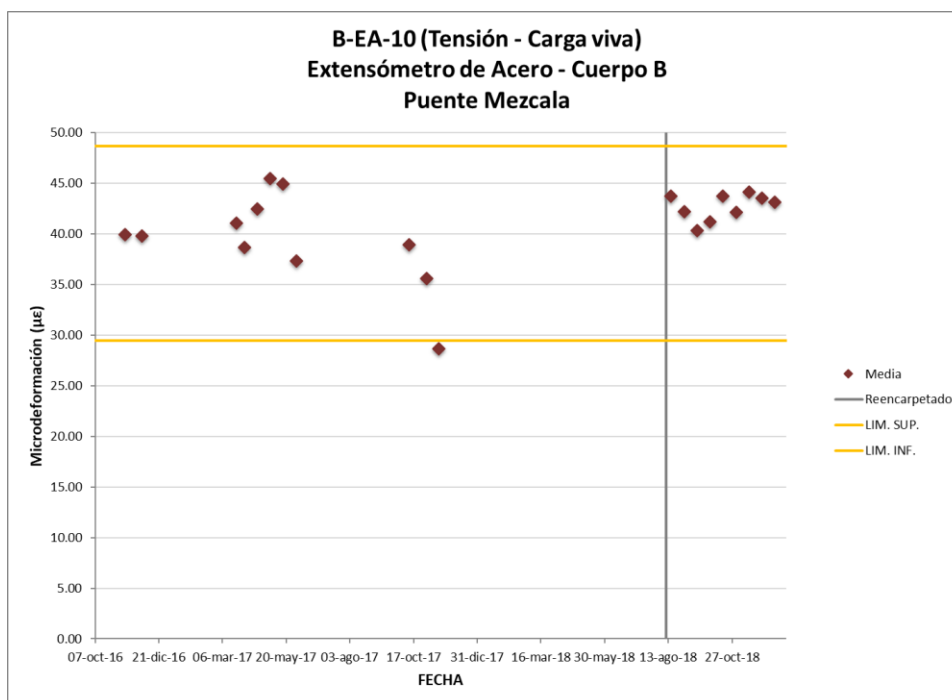


Figura 3.85 Media estadística del extensómetro B-EA-10 a tensión

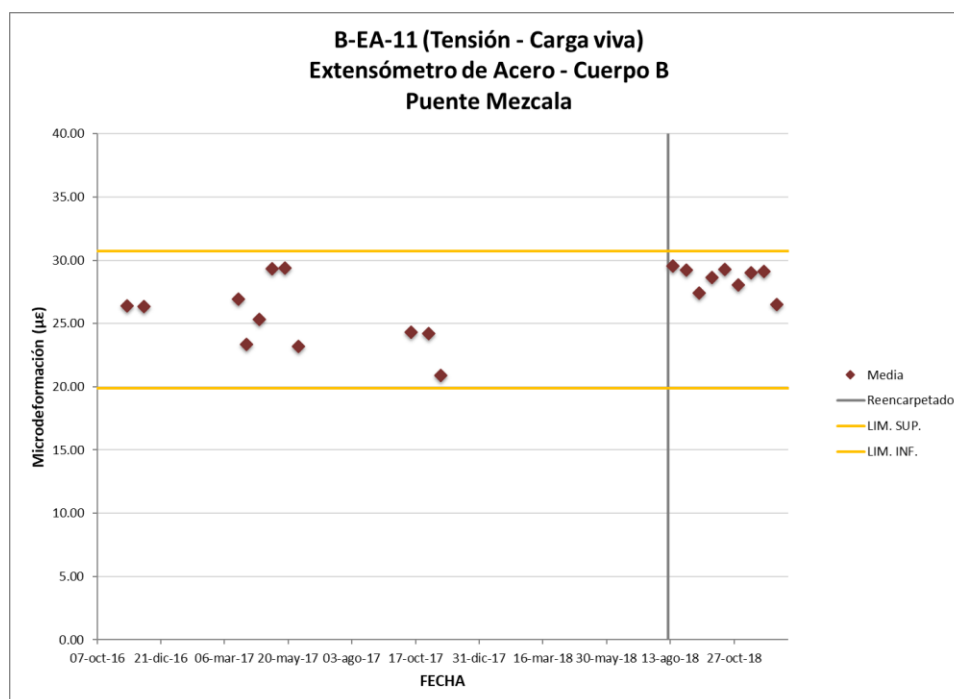


Figura 3.86 Media estadística del extensómetro B-EA-11 a tensión

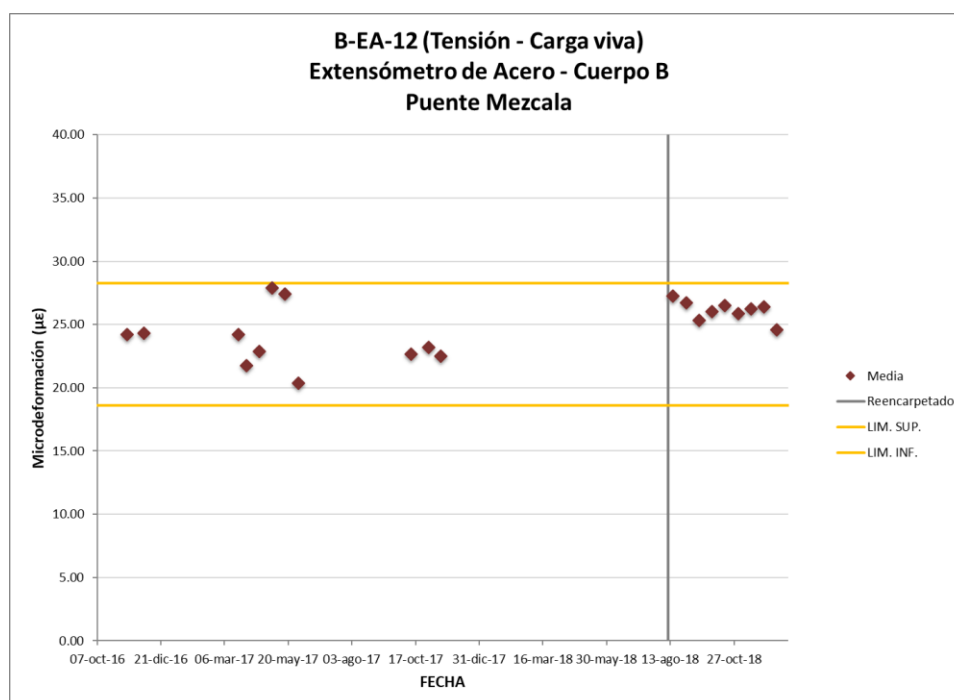


Figura 3.87 Media estadística del extensómetro B-EA-12 a tensión

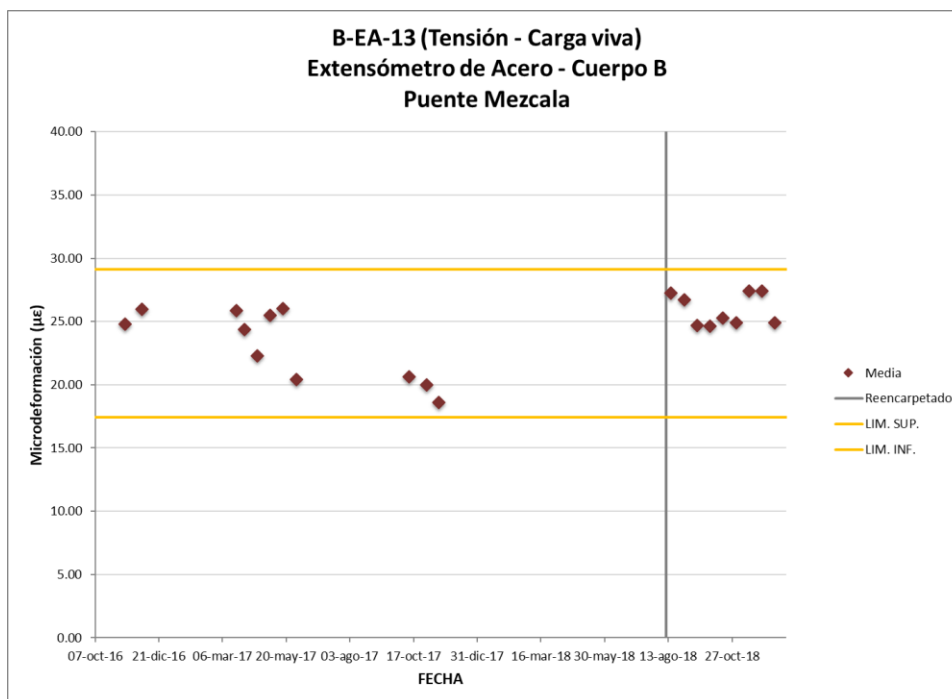


Figura 3.88 Media estadística del extensómetro B-EA-13 a tensión

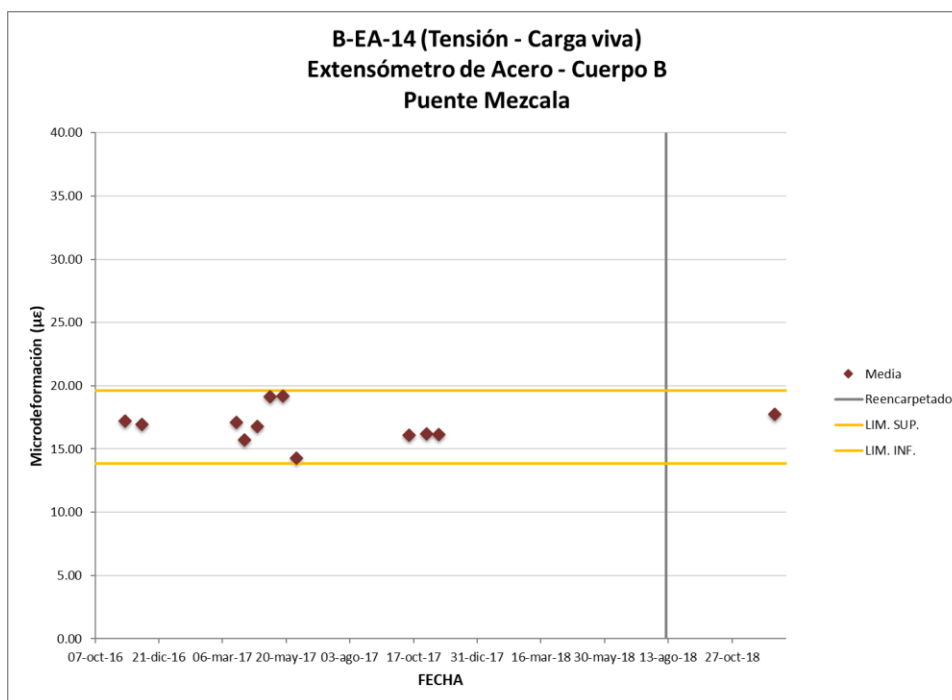


Figura 3.89 Media estadística del extensómetro B-EA-14 a tensión

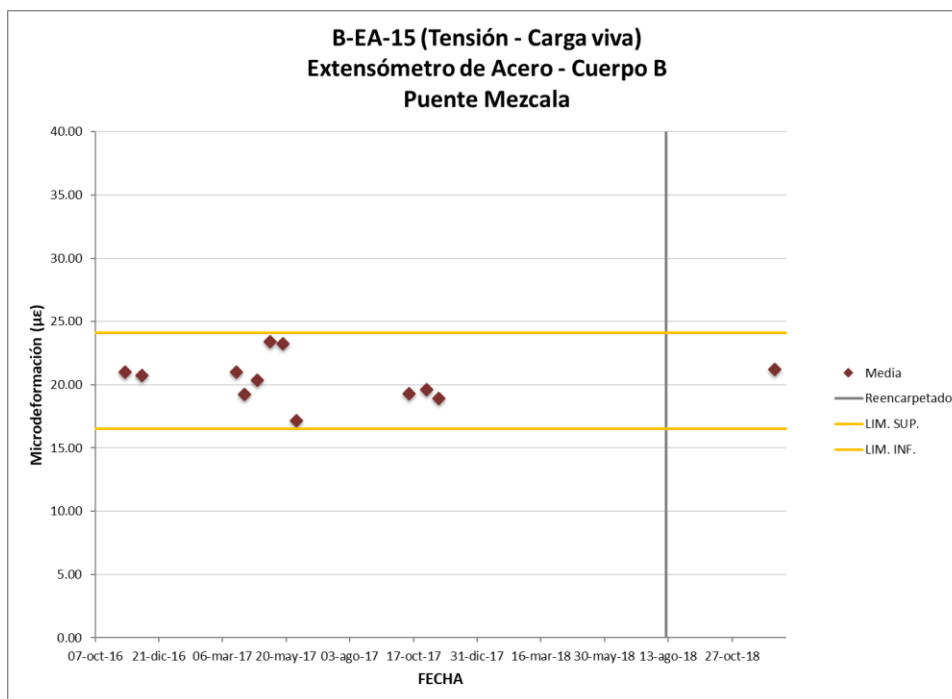


Figura 3.90 Media estadística del extensómetro B-EA-15 a tensión

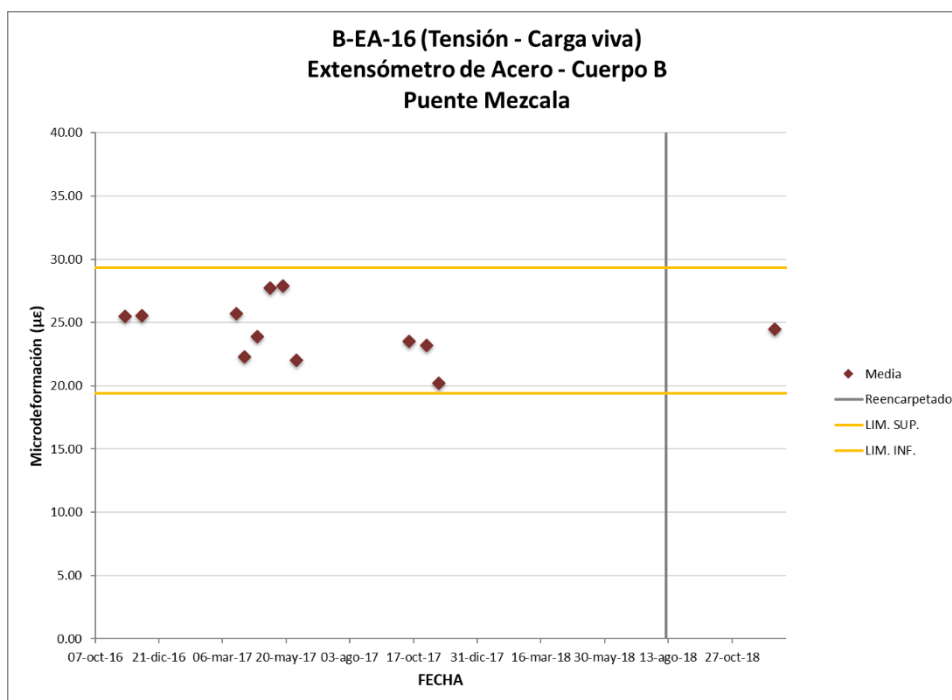


Figura 3.91 Media estadística del extensómetro B-EA-16 a tensión

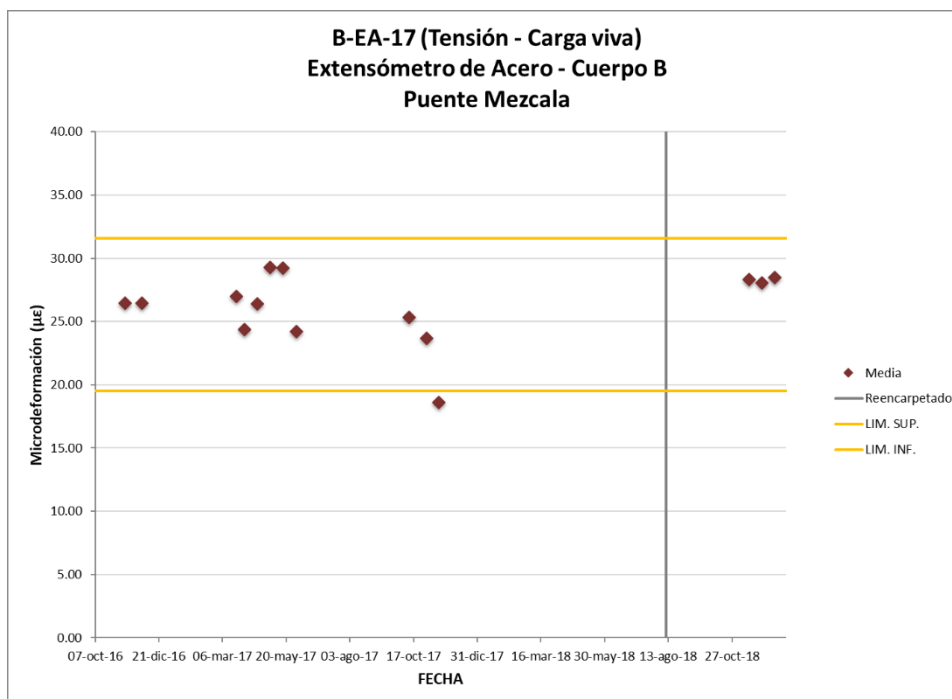


Figura 3.92 Media estadística del extensómetro B-EA-17 a tensión

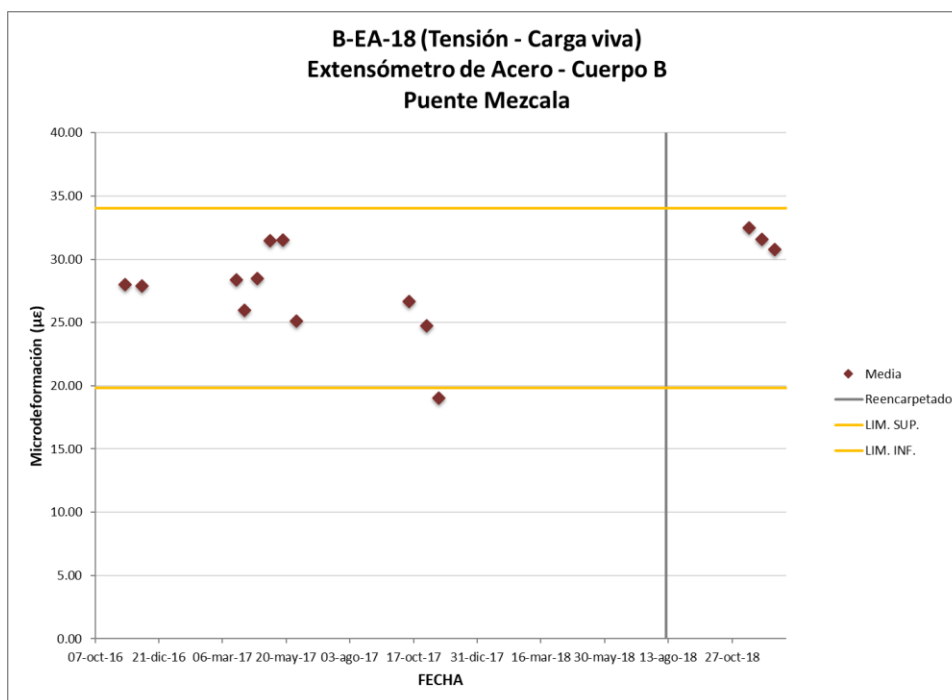


Figura 3.93 Media estadística del extensómetro B-EA-18 a tensión

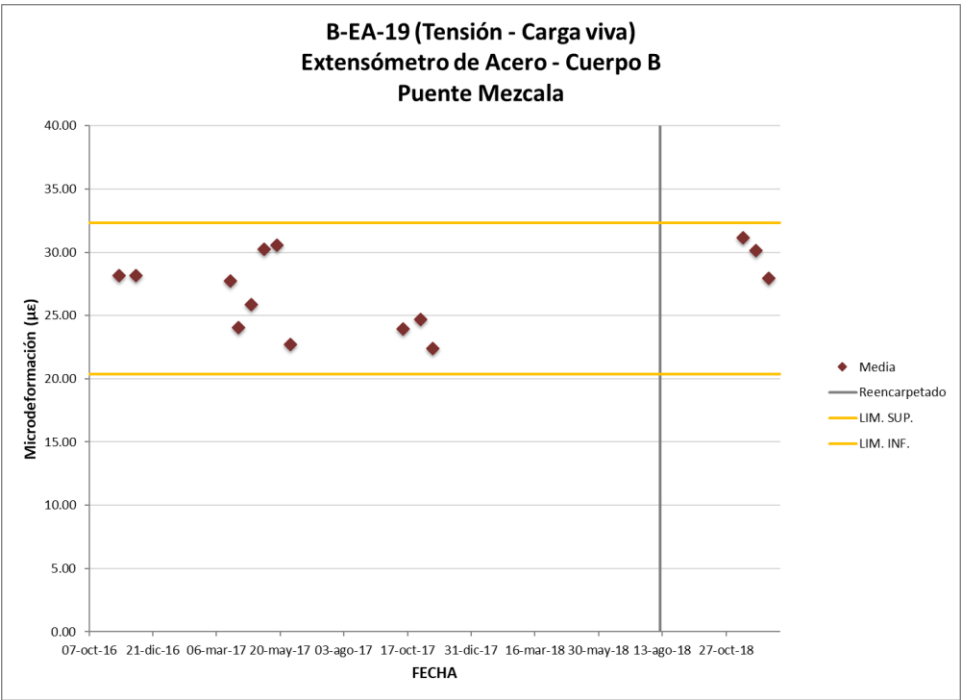


Figura 3.94 Media estadística del extensómetro B-EA-19 a tensión

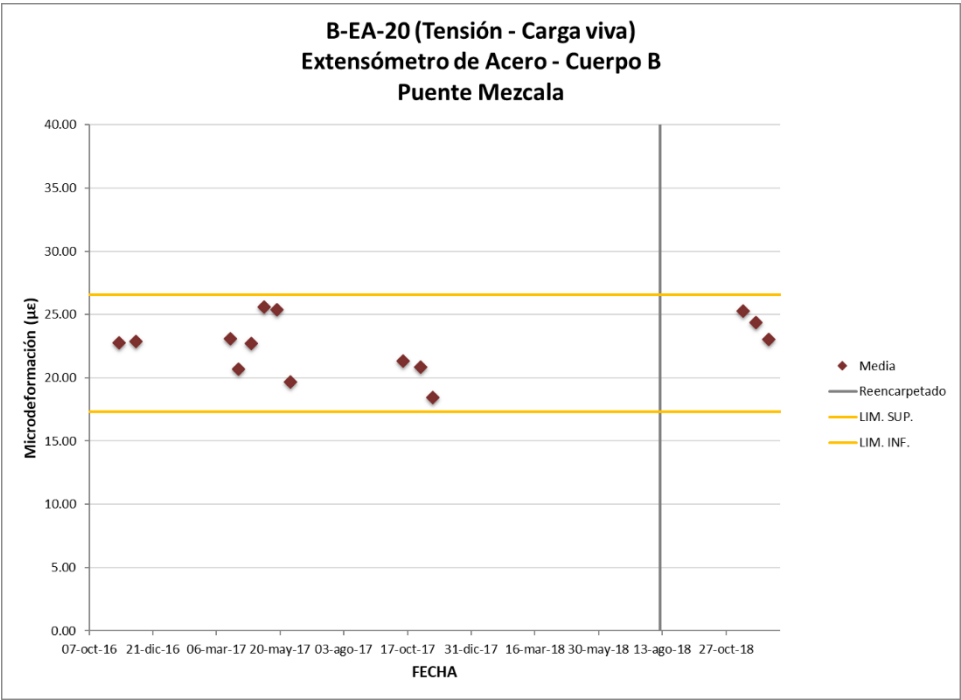


Figura 3.95 Media estadística del extensómetro B-EA-20 a tensión

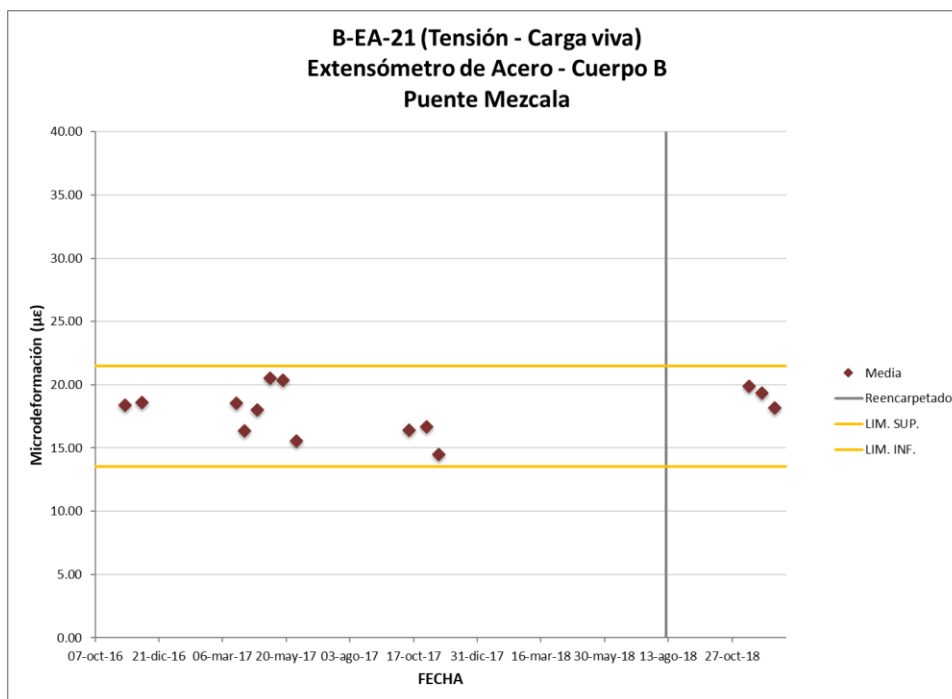


Figura 3.96 Media estadística del extensómetro B-EA-21 a tensión

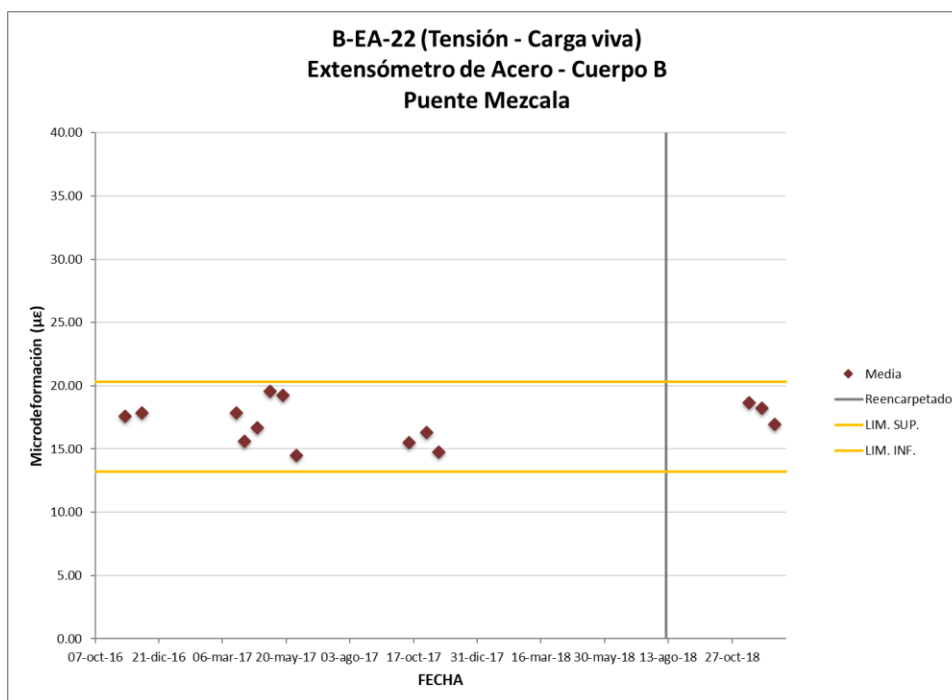


Figura 3.97 Media estadística del extensómetro B-EA-22 a tensión

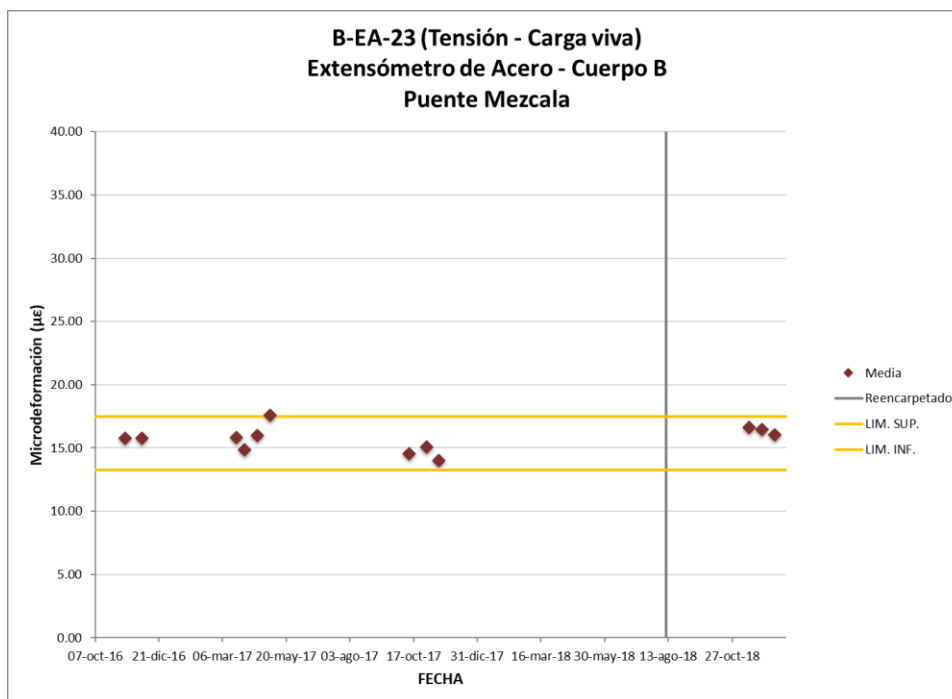


Figura 3.98 Media estadística del extensómetro B-EA-23 a tensión

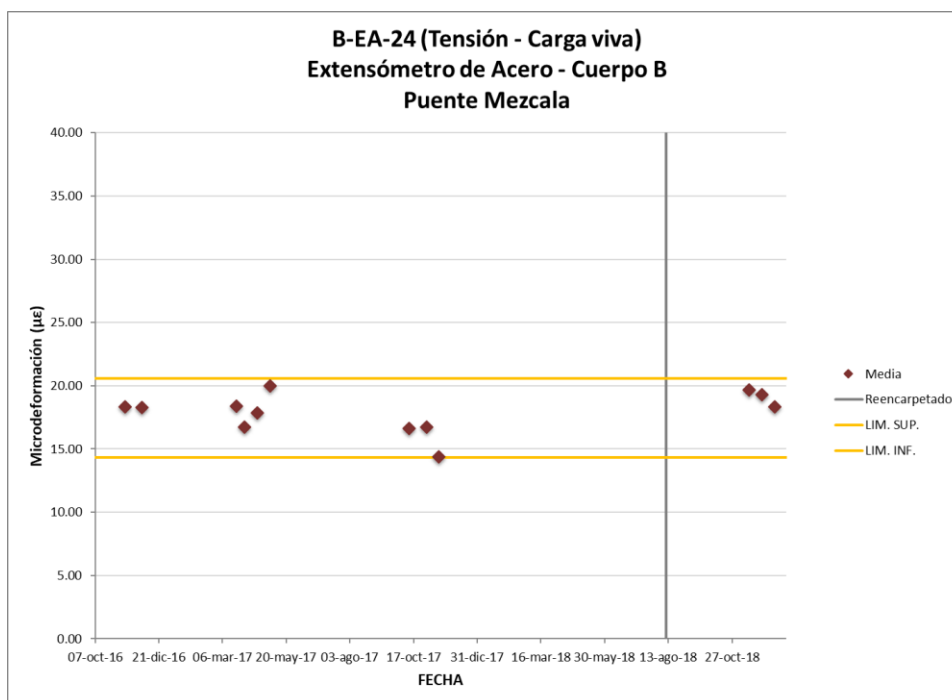


Figura 3.99 Media estadística del extensómetro B-EA-24 a tensión

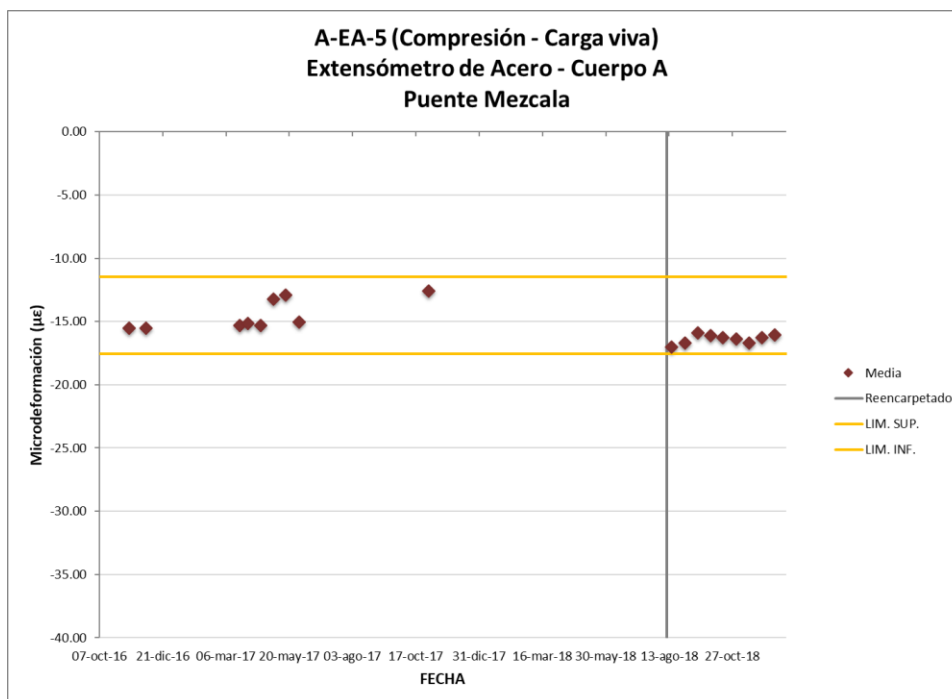


Figura 3.100 Media estadística del extensómetro A-EA-5 a compresión

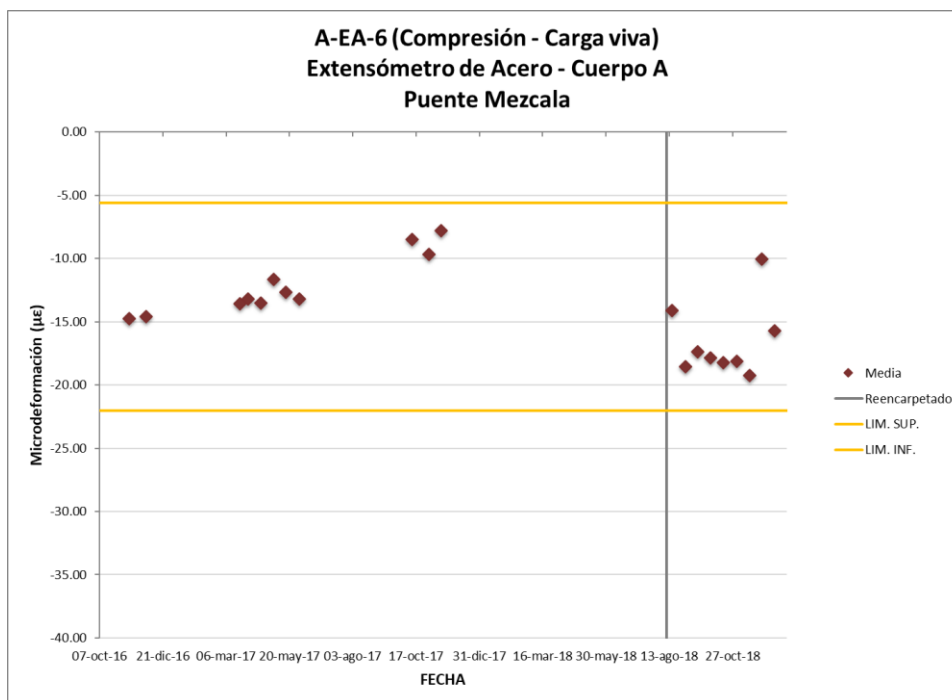


Figura 3.101 Media estadística del extensómetro A-EA-6 a compresión

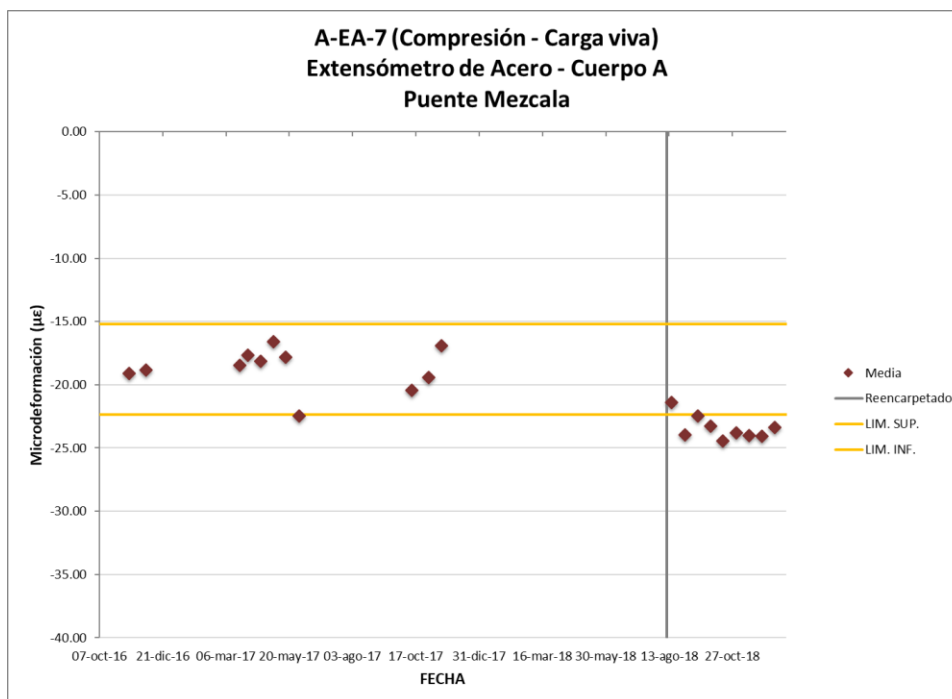


Figura 3.102 Media estadística del extensómetro A-EA-7 a compresión

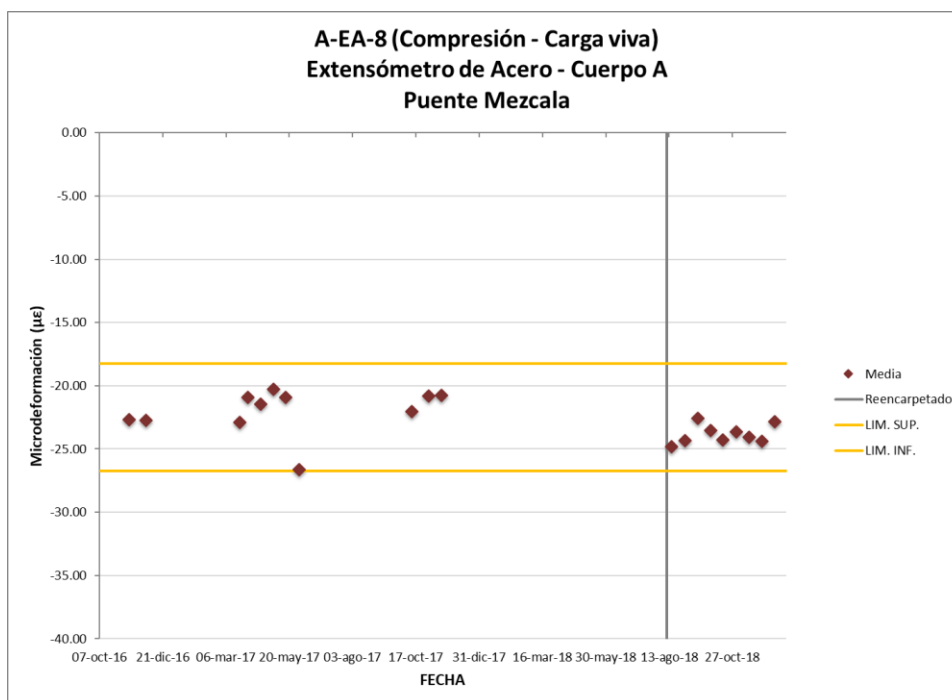


Figura 3.103 Media estadística del extensómetro A-EA-8 a compresión

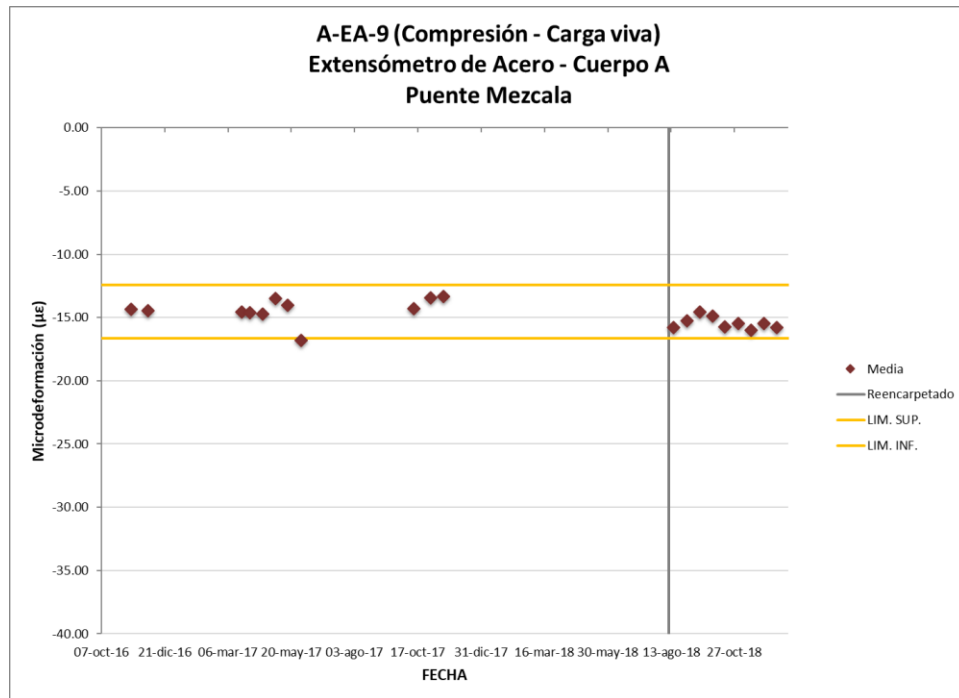


Figura 3.104 Media estadística del extensómetro A-EA-9 a compresión

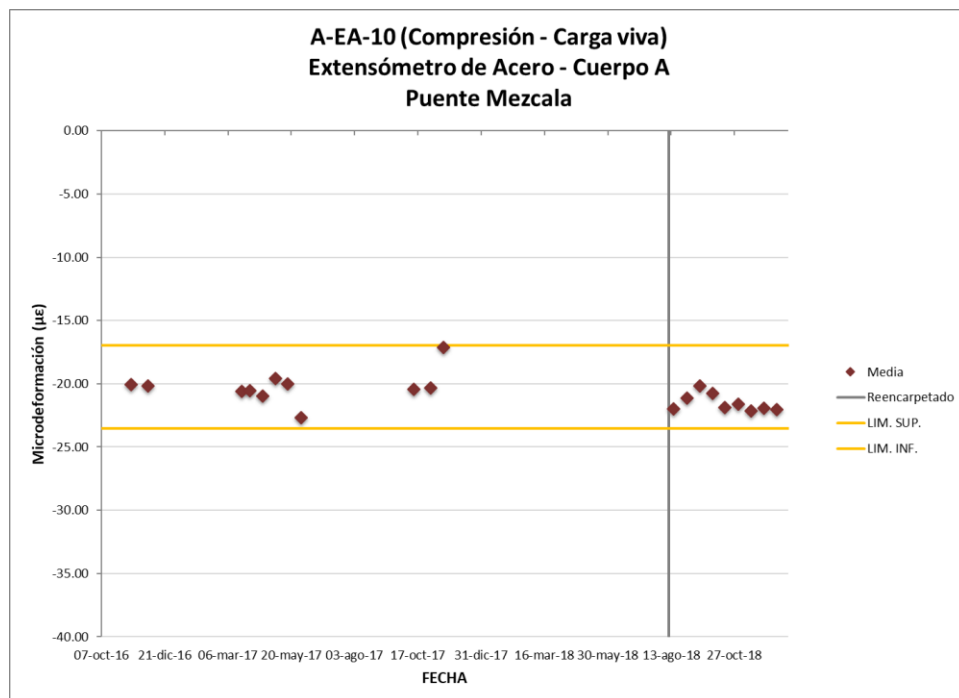


Figura 3.105 Media estadística del extensómetro A-EA-10 a compresión

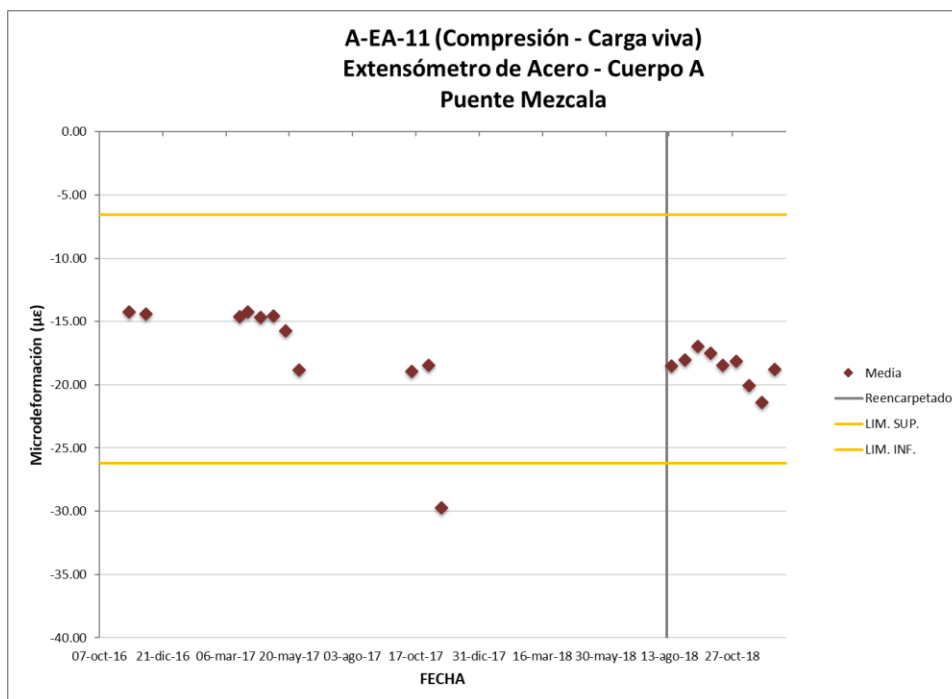


Figura 3.106 Media estadística del extensómetro A-EA-11 a compresión

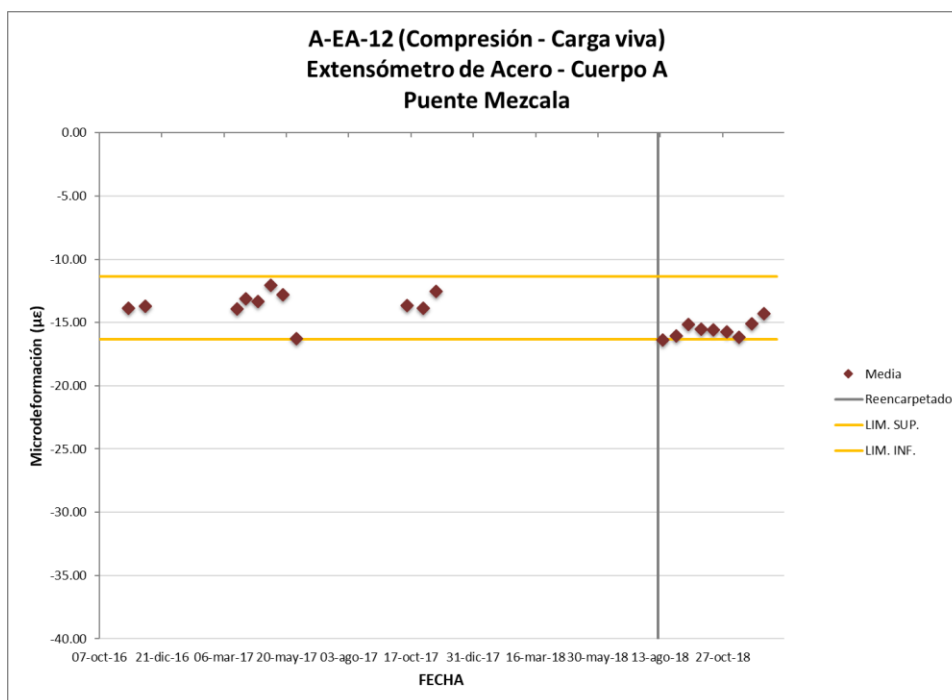


Figura 3.107 Media estadística del extensómetro A-EA-12 a compresión

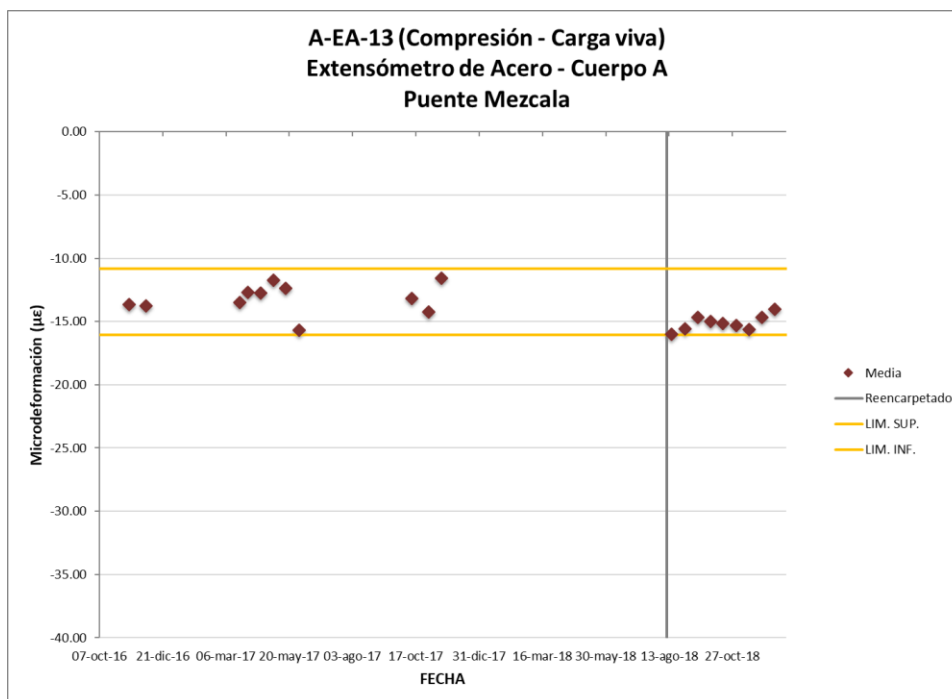


Figura 3.108 Media estadística del extensómetro A-EA-13 a compresión

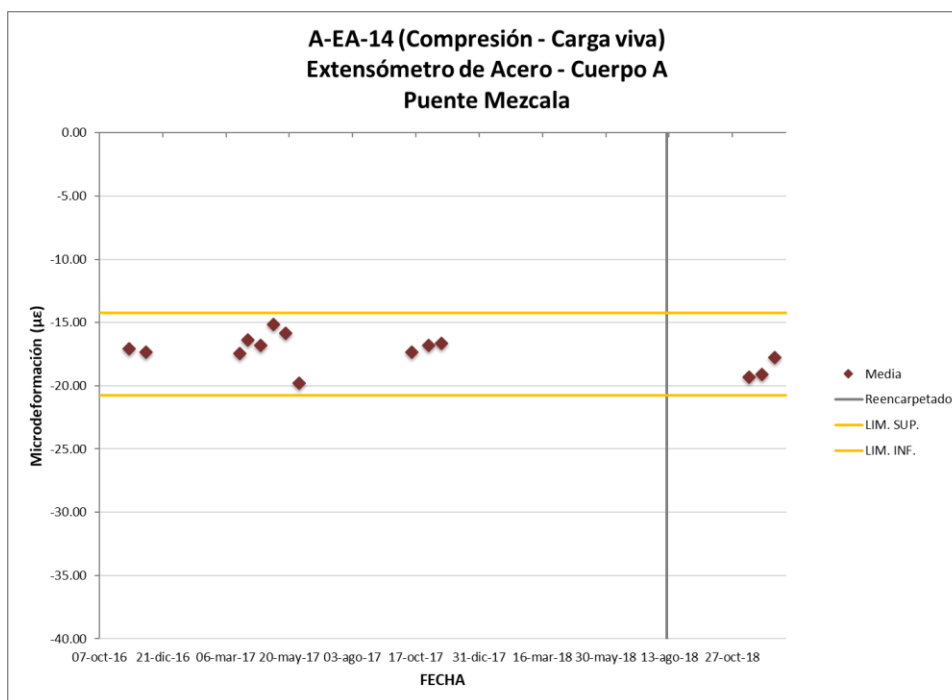


Figura 3.109 Media estadística del extensómetro A-EA-14 a compresión

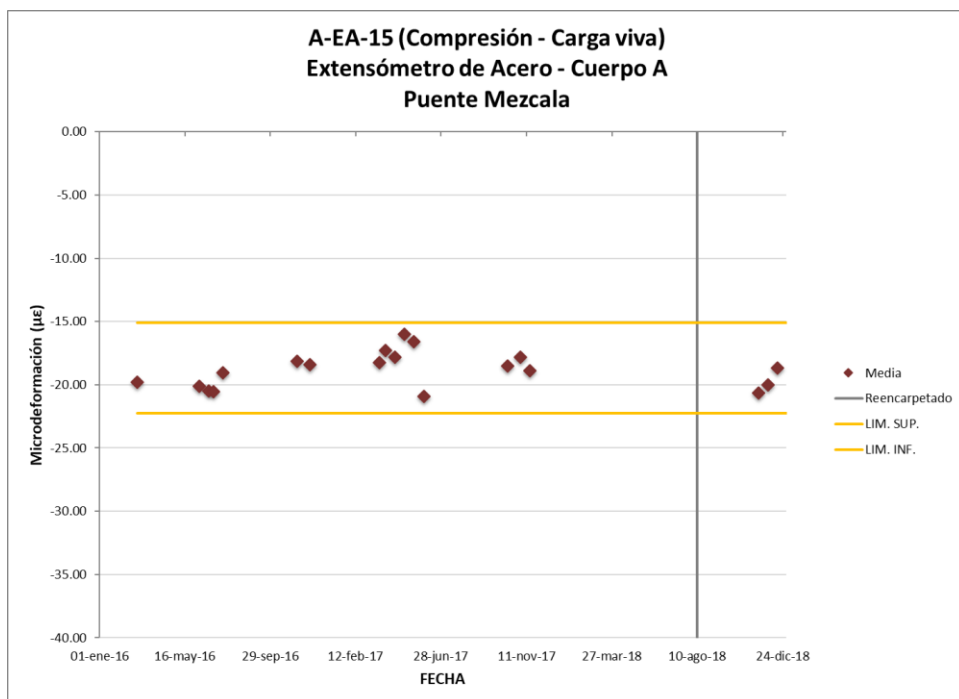


Figura 3.110 Media estadística del extensómetro A-EA-15 a compresión

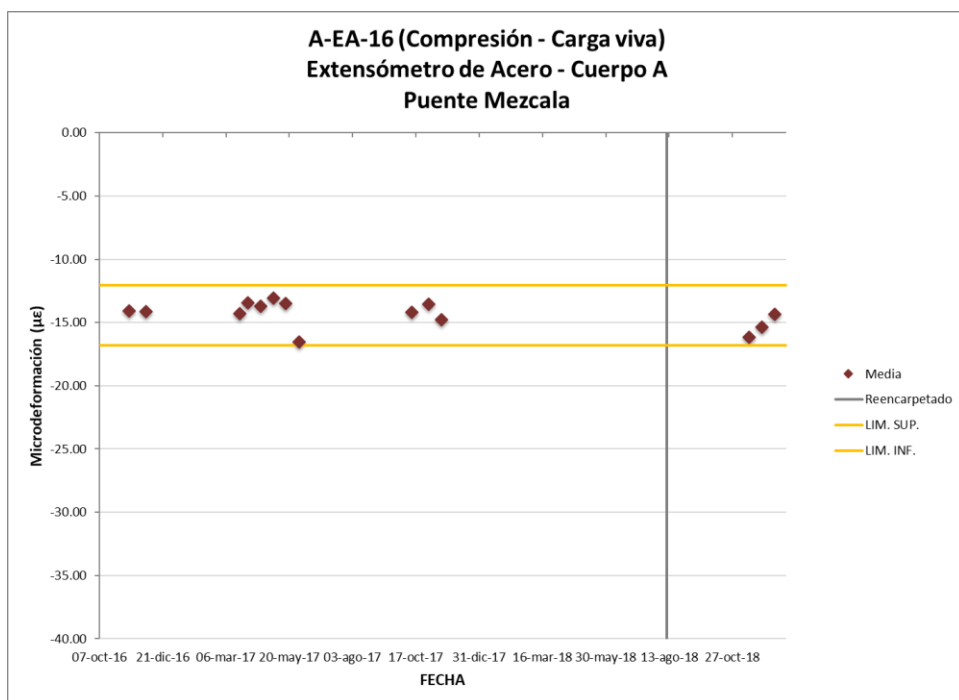


Figura 3.111 Media estadística del extensómetro A-EA-16 a compresión

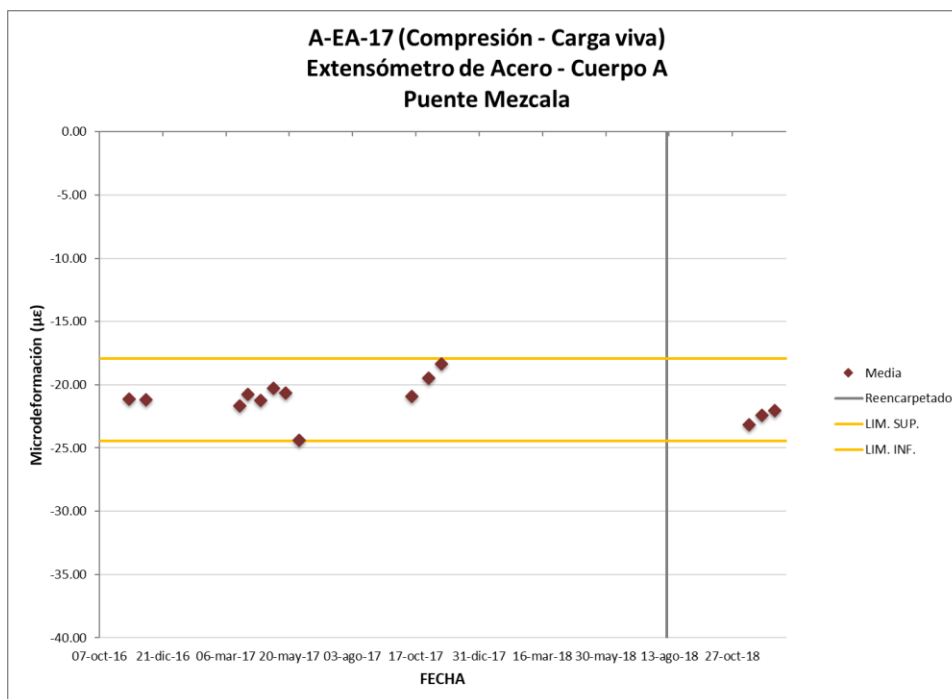


Figura 3.112 Media estadística del extensómetro A-EA-17 a compresión

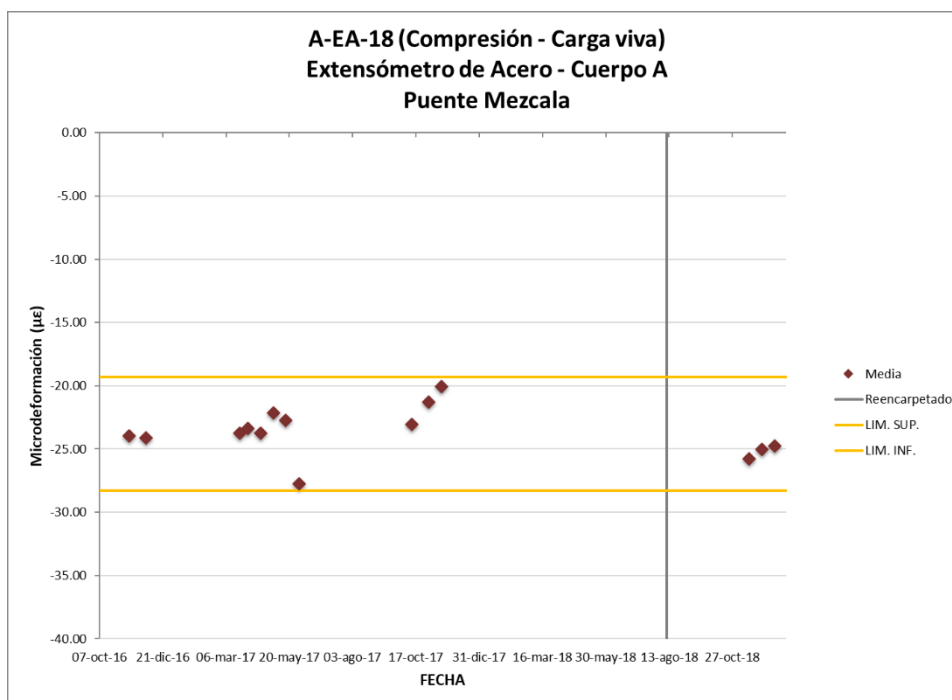


Figura 3.113 Media estadística del extensómetro A-EA-18 a compresión

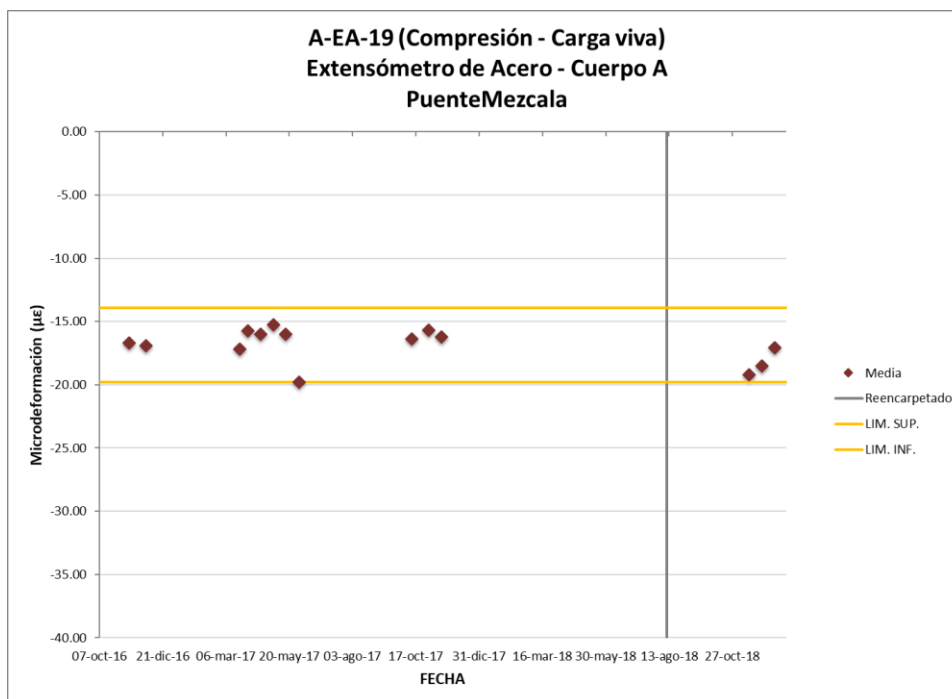


Figura 3.114 Media estadística del extensómetro A-EA-19 a compresión

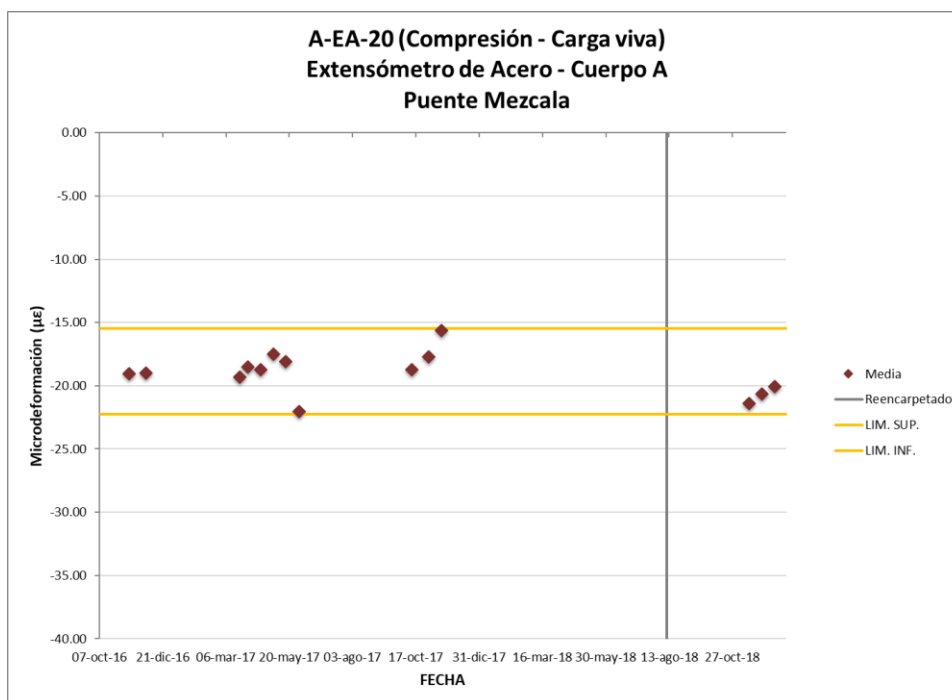


Figura 3.115 Media estadística del extensómetro A-EA-20 a compresión

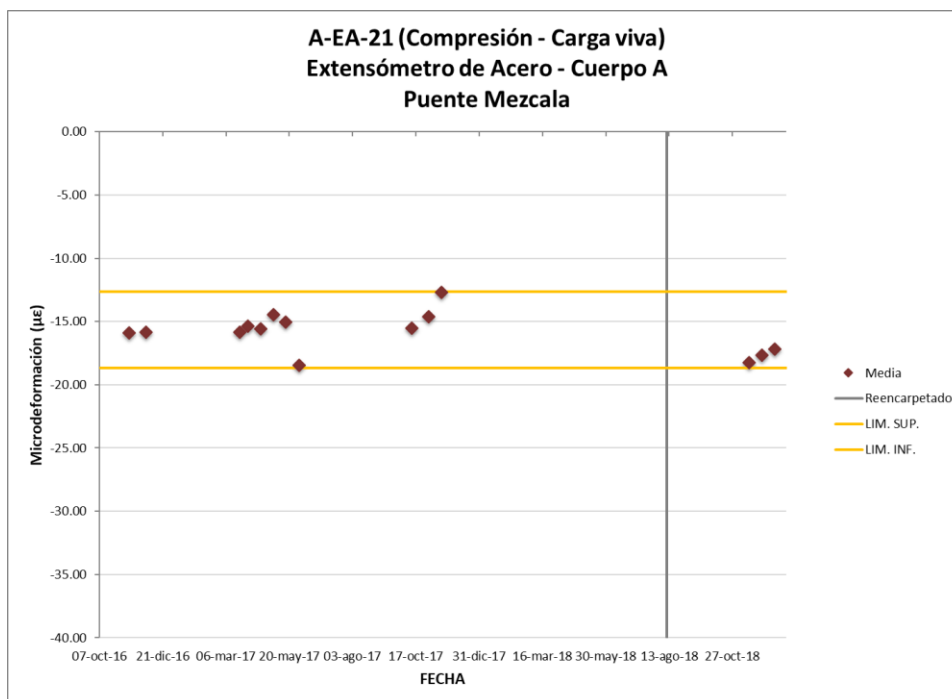


Figura 3.116 Media estadística del extensómetro A-EA-21 a compresión

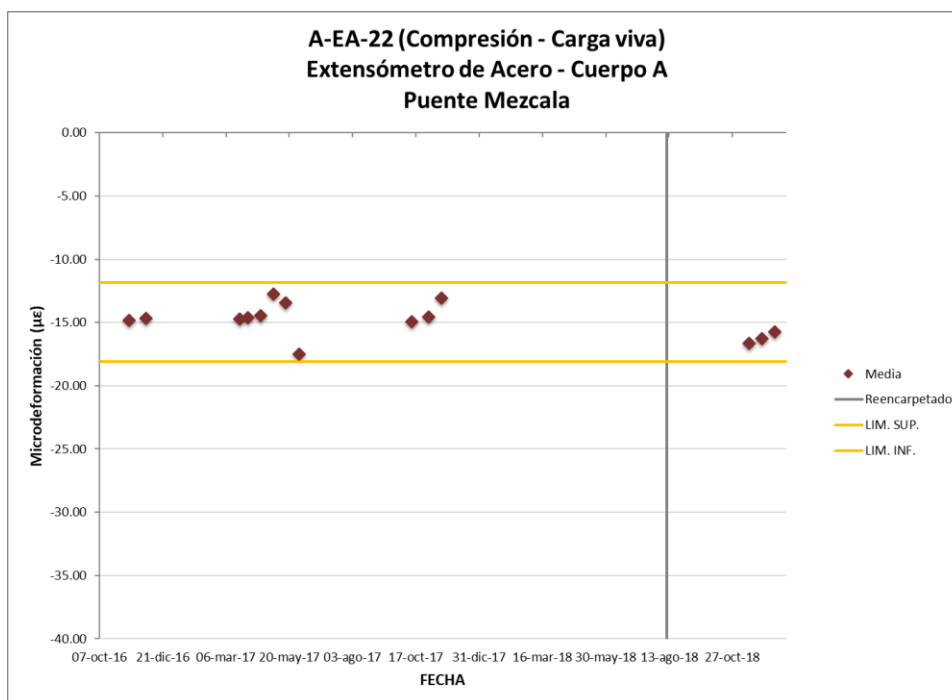


Figura 3.117 Media estadística del extensómetro A-EA-22 a compresión

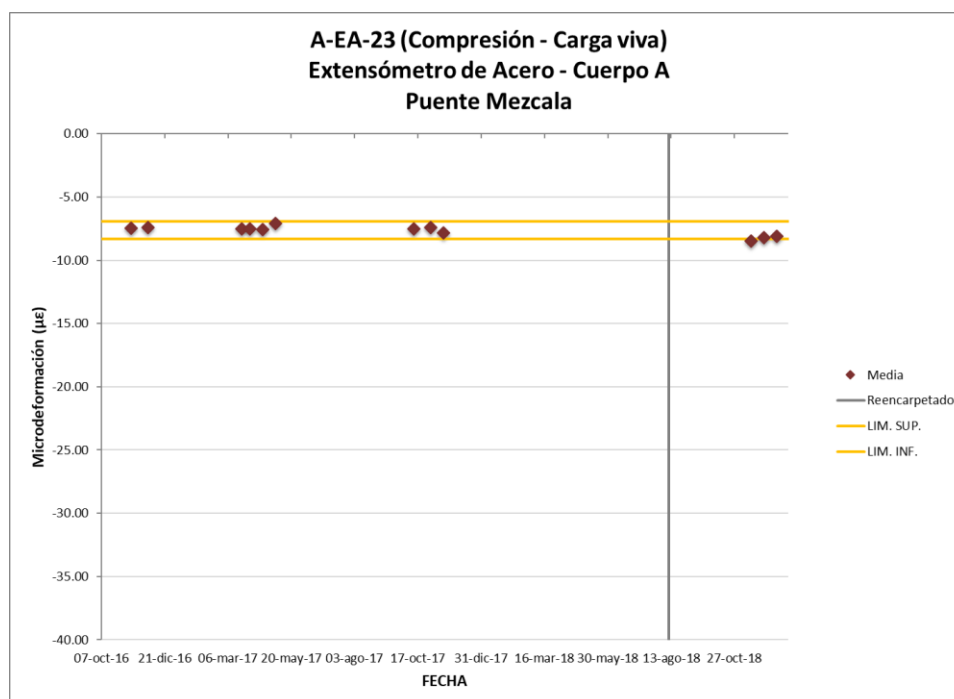


Figura 3.118 Media estadística del extensómetro A-EA-23 a compresión

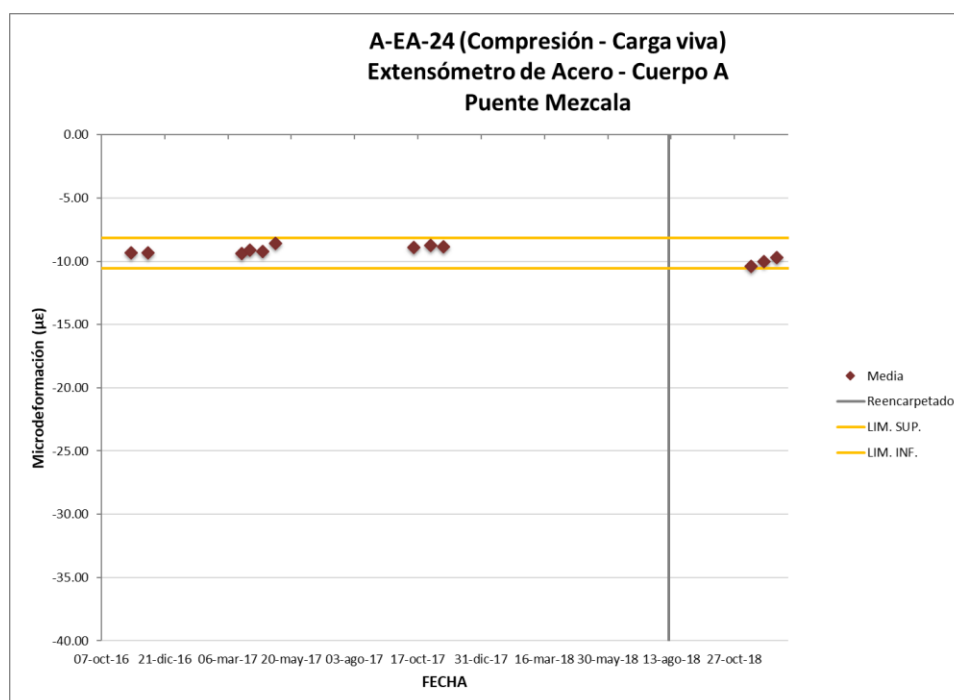


Figura 3.119 Media estadística del extensómetro A-EA-24 a compresión

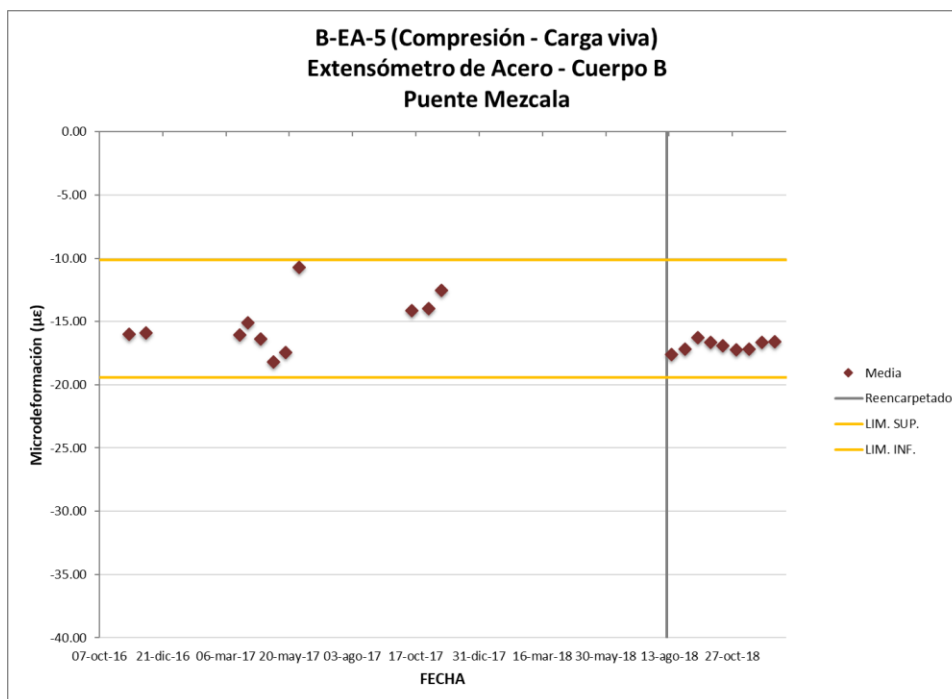


Figura 3.120 Media estadística del extensómetro B-EA-5 a compresión

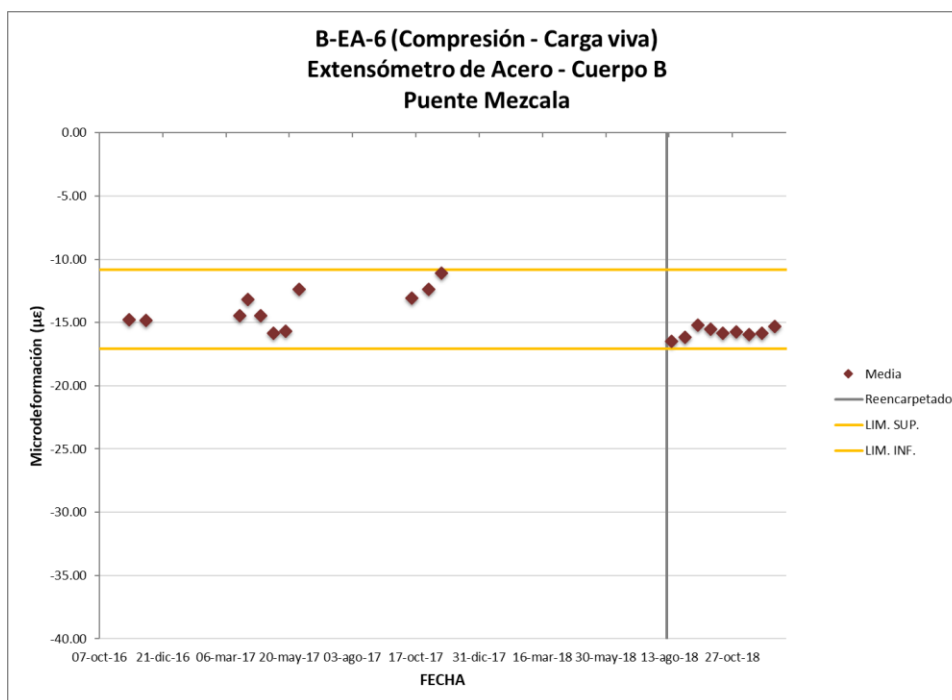


Figura 3.121 Media estadística del extensómetro B-EA-6 a compresión

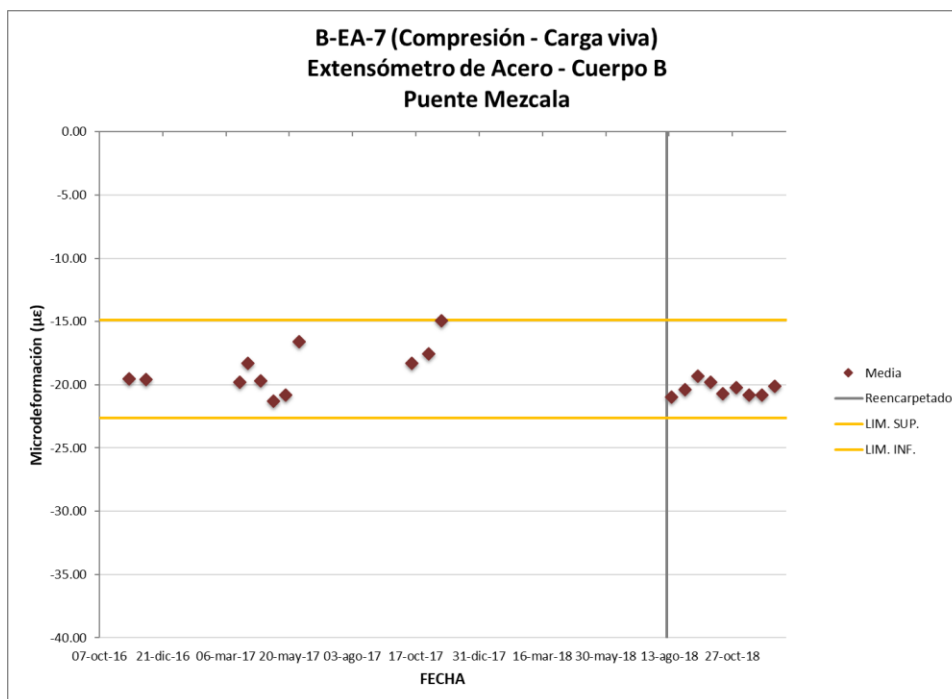


Figura 3.122 Media estadística del extensómetro B-EA-7 a compresión

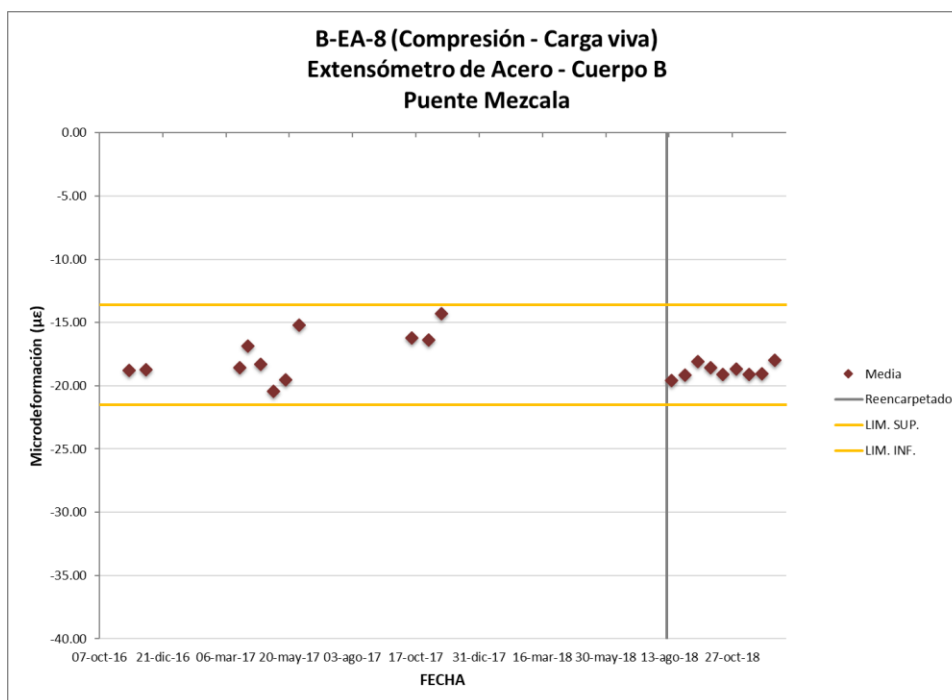


Figura 3.123 Media estadística del extensómetro B-EA-8 a compresión

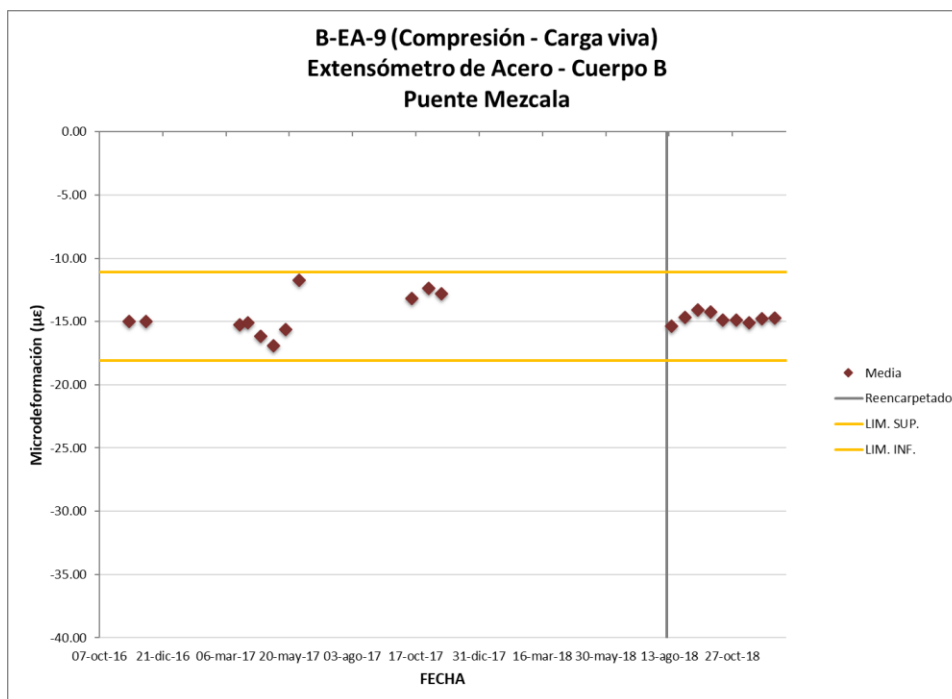


Figura 3.124 Media estadística del extensómetro B-EA-9 a compresión

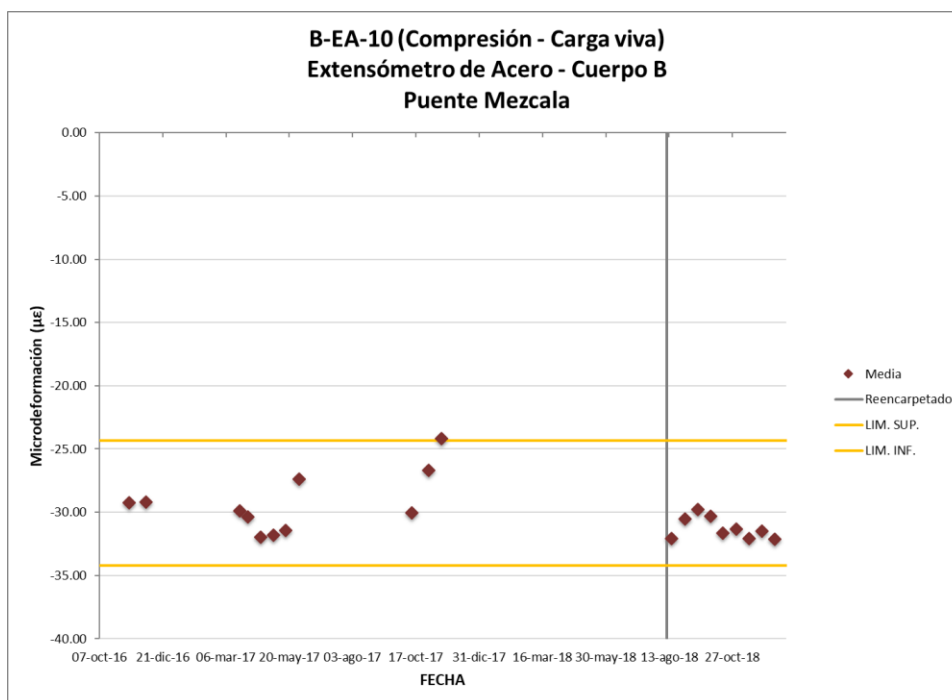


Figura 3.125 Media estadística del extensómetro B-EA-10 a compresión

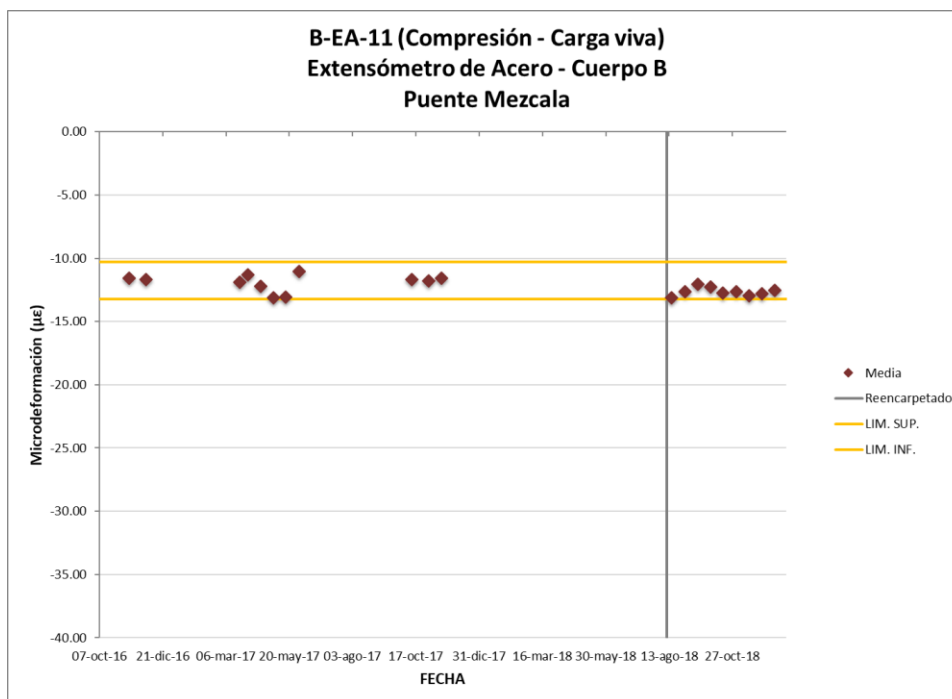


Figura 3.126 Media estadística del extensómetro B-EA-11 a compresión

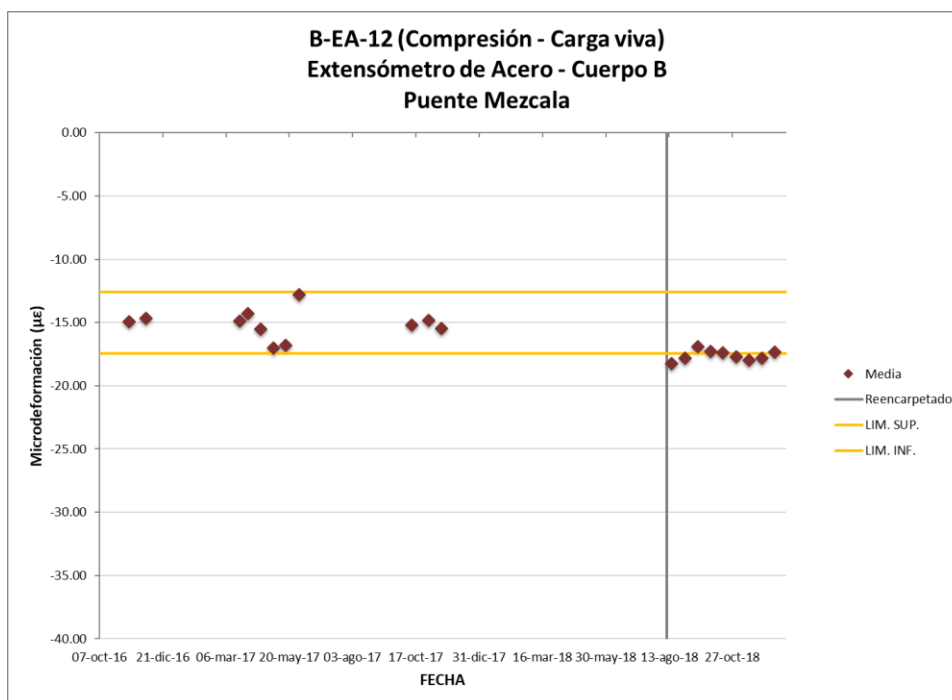


Figura 3.127 Media estadística del extensómetro B-EA-12 a compresión

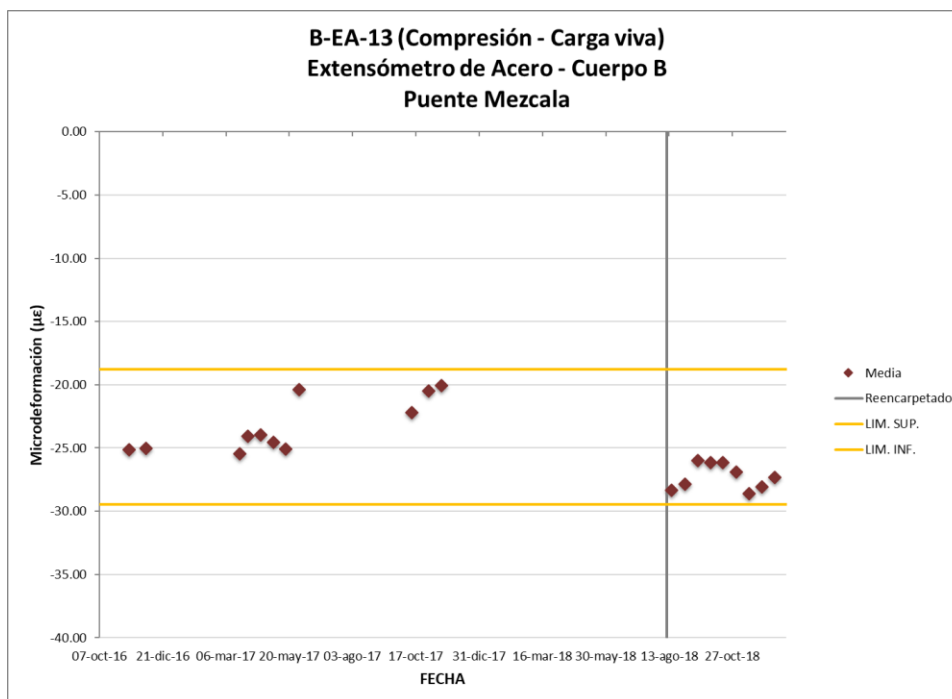


Figura 3.128 Media estadística del extensómetro B-EA-13 a compresión

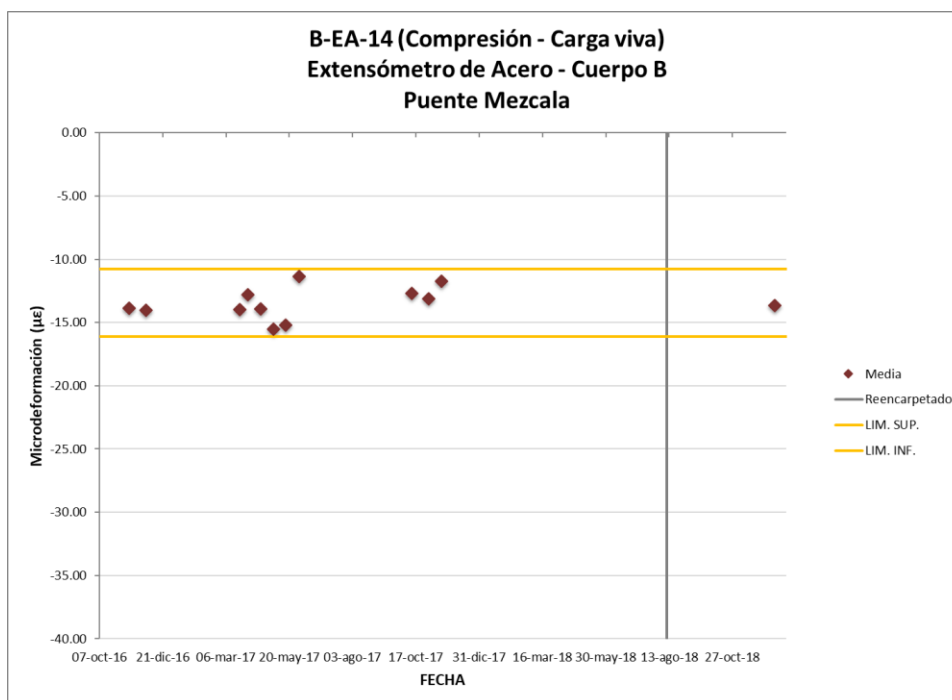


Figura 3.129 Media estadística del extensómetro B-EA-14 a compresión

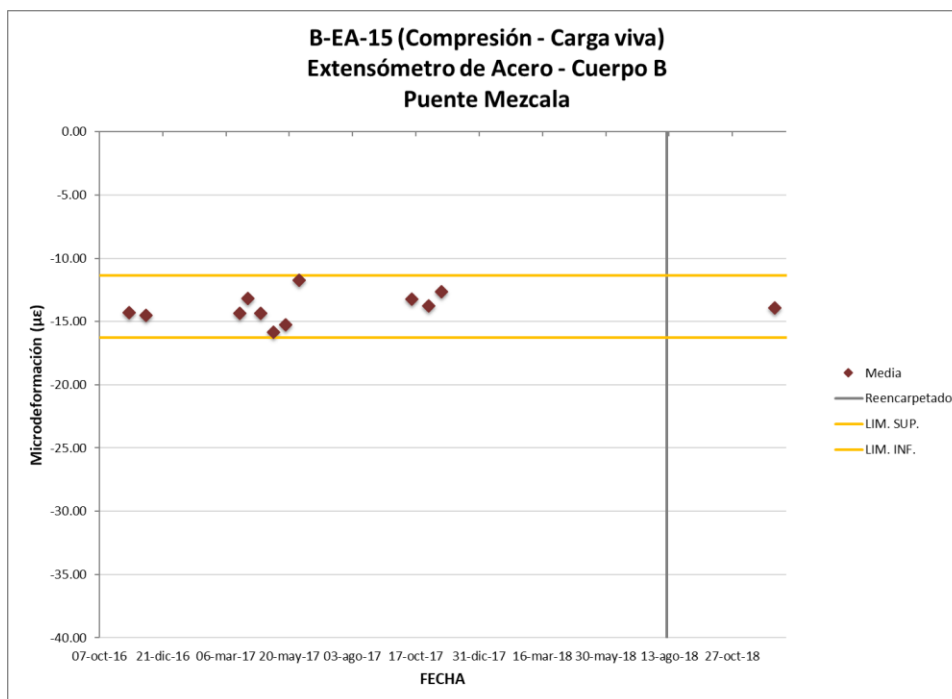


Figura 3.130 Media estadística del extensómetro B-EA-15 a compresión

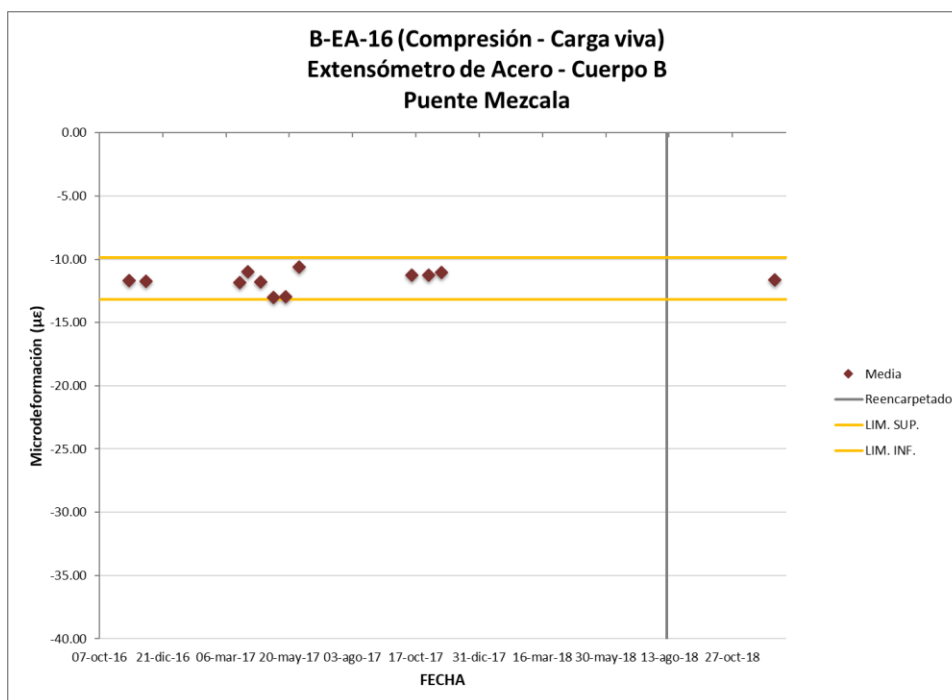


Figura 3.131 Media estadística del extensómetro B-EA-16 a compresión

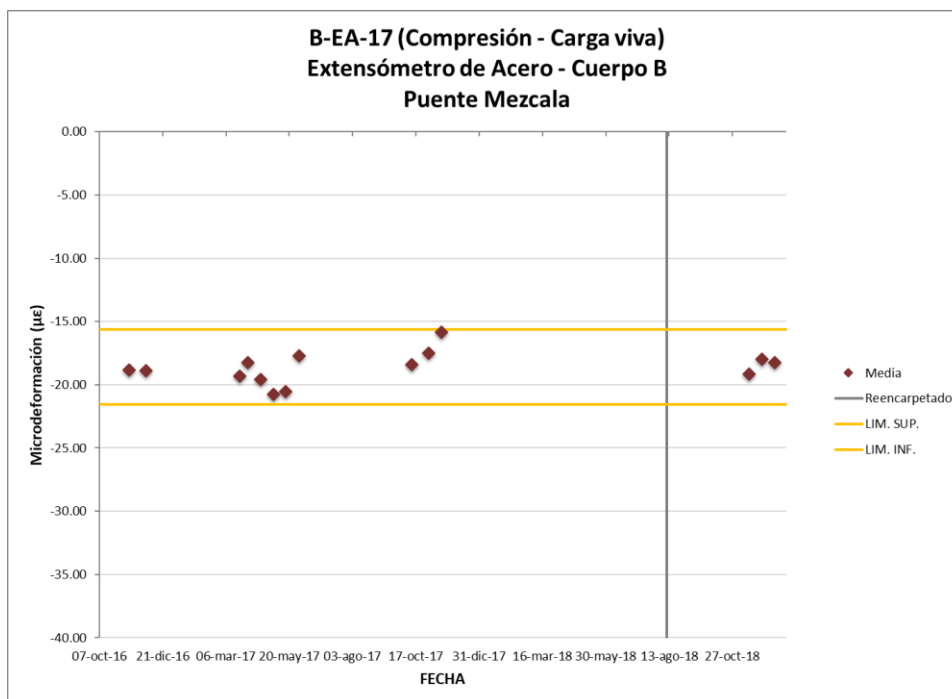


Figura 3.132 Media estadística del extensómetro B-EA-17 a compresión

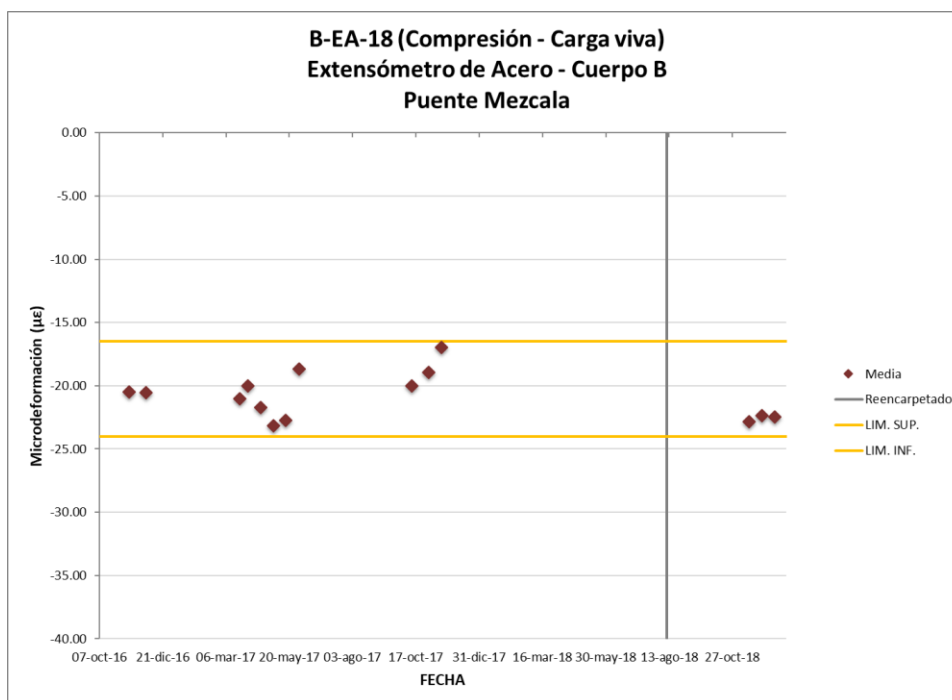


Figura 3.133 Media estadística del extensómetro B-EA-18 a compresión

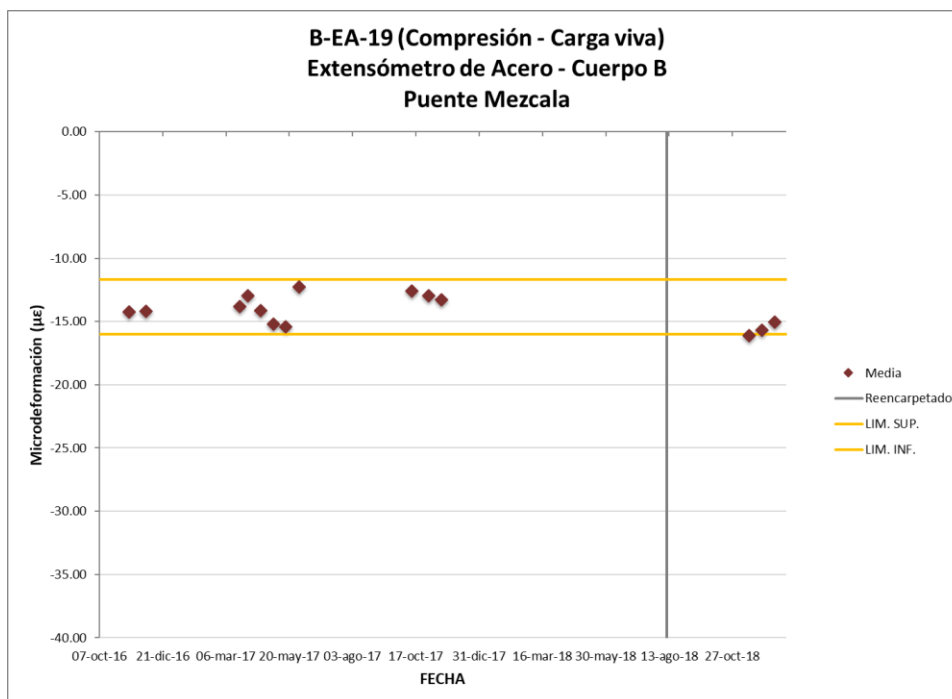


Figura 3.134 Media estadística del extensómetro B-EA-19 a compresión

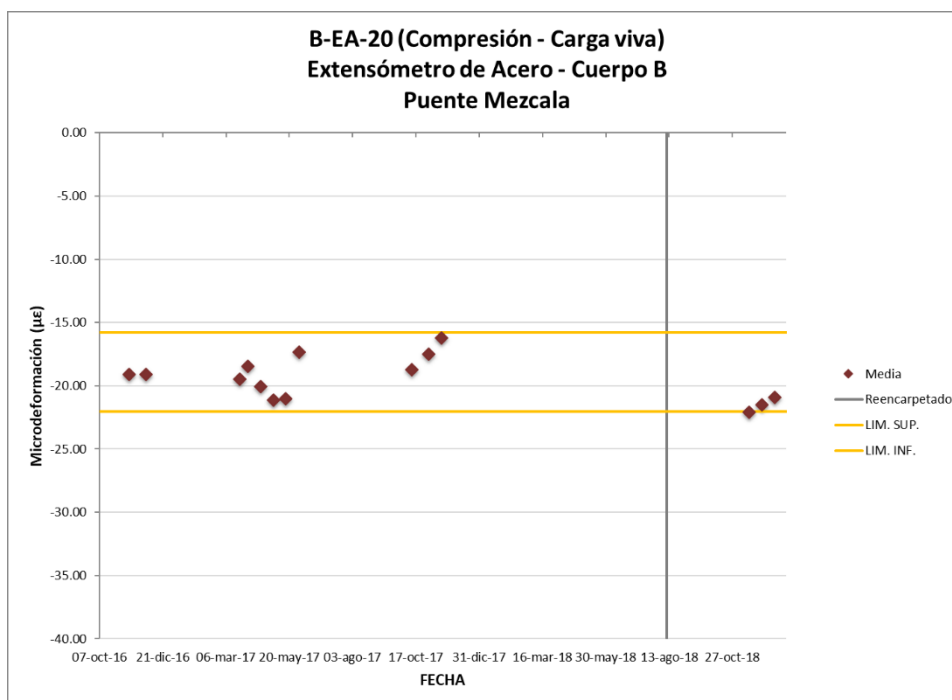


Figura 3.135 Media estadística del extensómetro B-EA-20 a compresión

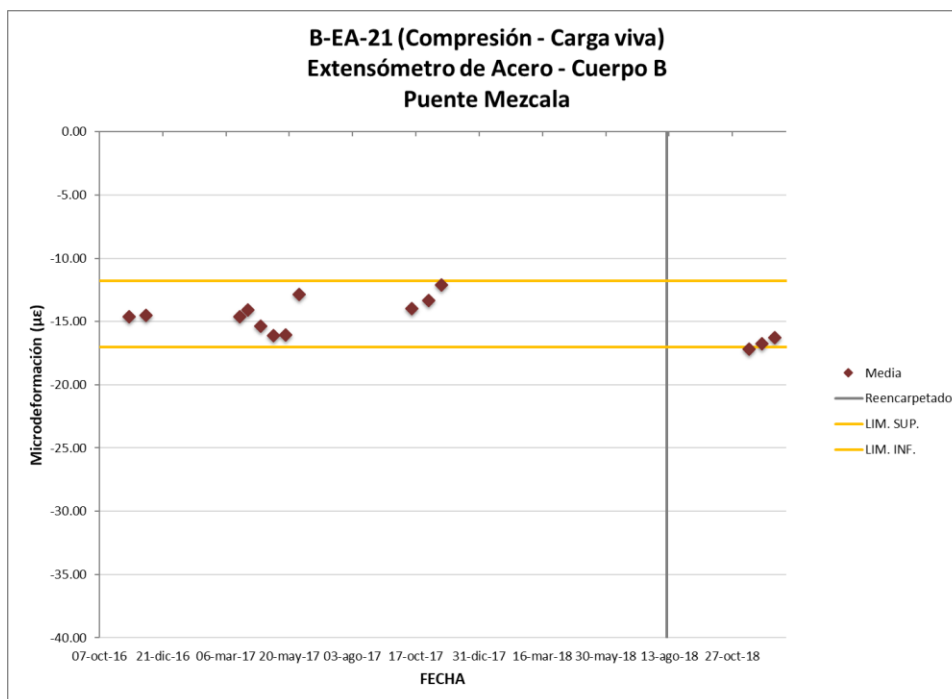


Figura 3.136 Media estadística del extensómetro B-EA-21 a compresión

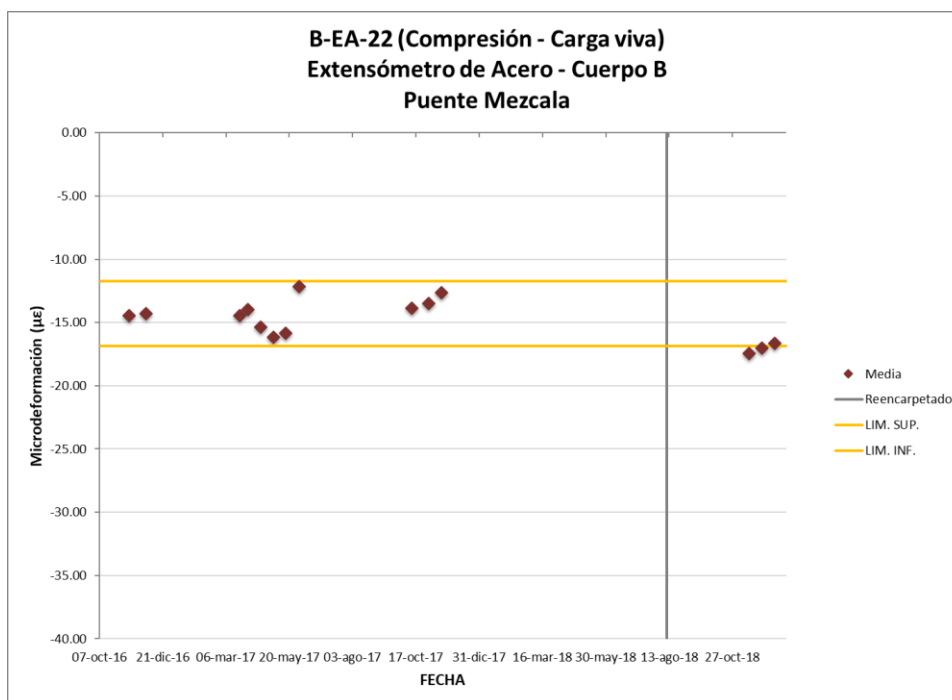


Figura 3.137 Media estadística del extensómetro B-EA-22 a compresión

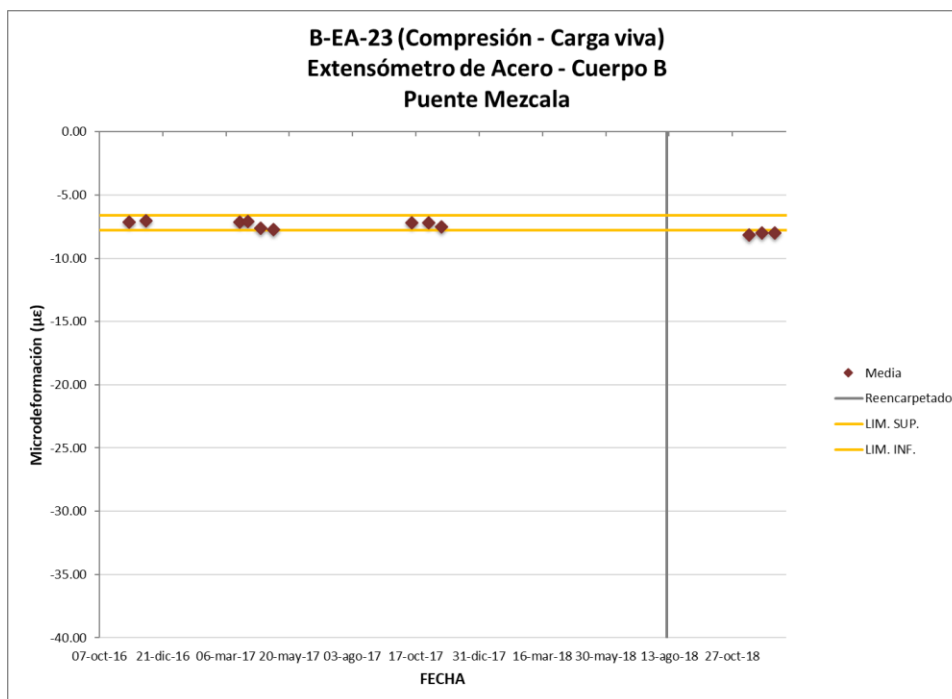


Figura 3.138 Media estadística del extensómetro B-EA-23 a compresión

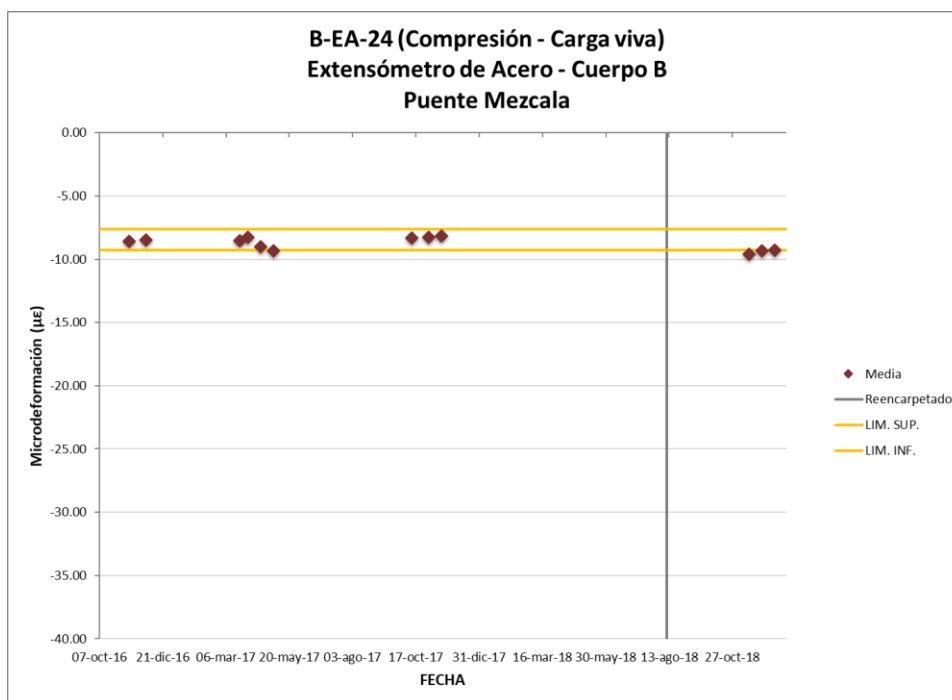


Figura 3.139 Media estadística del extensómetro B-EA-24 a compresión

Para obtener las frecuencias naturales del puente Mezcala y dar seguimiento a estos valores en el tiempo, se utilizaron las respuestas dinámicas de los sensores de deformación instalados en la parte inferior de las vigas principales. Los datos de los extensómetros fueron adquiridos a una frecuencia de muestreo de 62.5 Hz. En la figura 3.140 se puede observar la respuesta dinámica típica de un extensómetro.

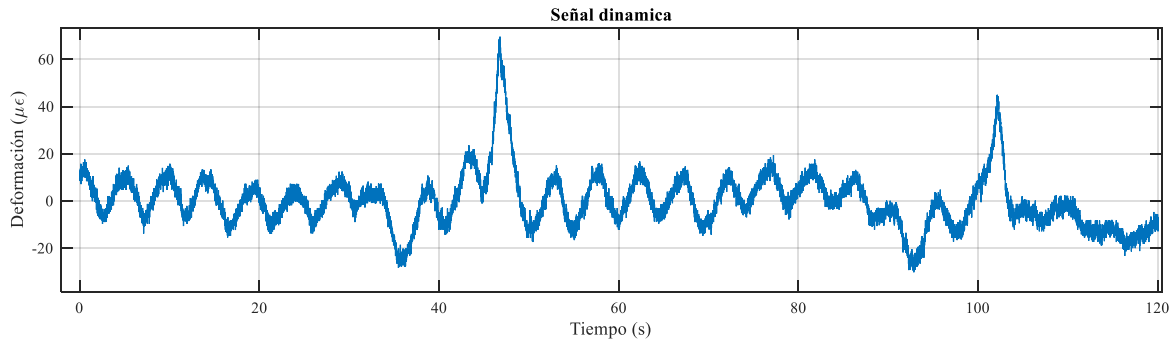


Figura 3.140 Señal típica de un extensómetro ante excitaciones ambientales

La metodología se basa primero en la identificación del intervalo de frecuencia donde se manifiestan las primeras diez frecuencias y modos de vibrar de la estructura. El intervalo de frecuencias se define con los datos e información de un modelo de elemento finito calibrado de la estructura. Este intervalo de frecuencias es utilizado para aplicar un filtro pasa bandas y por lo tanto disminuir los efectos del ruido ambiental y los asociados a las frecuencias por el paso de vehículos. Para la identificación de las frecuencias naturales del puente Mezcala se aplicó un filtro pasa bandas del tipo Butterworth de orden 4, en un rango de frecuencias de 0.15 a 1.2 Hz. La figura 3.141 muestra la respuesta dinámica de un extensómetro una vez aplicado el filtro pasa bandas.

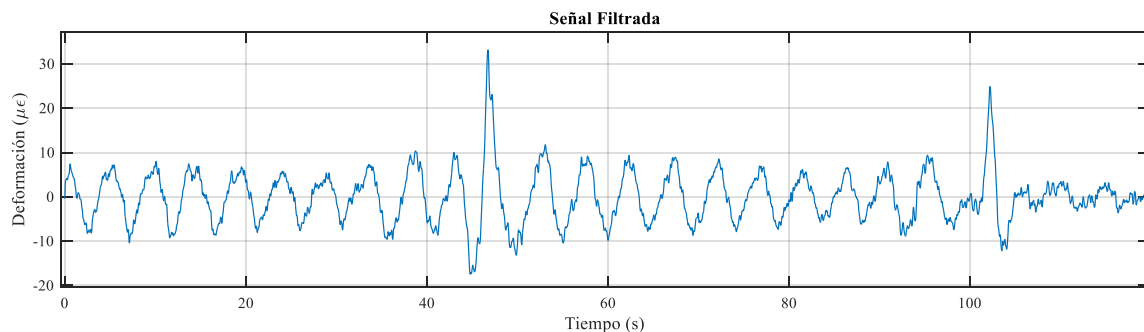


Figura 3.141 Señal típica de un extensómetro ante excitaciones ambientales

Una vez filtrada la señal, se aplica una ventana a los datos filtrados, la cual tiene como objetivo reducir el esparcimiento de la energía de las frecuencias naturales a las frecuencias adyacentes en el espectro [4], la función ventana aplicada para las respuestas dinámicas del puente Mezcala es una ventana tipo Hanning. La señal obtenida, se convierte del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante

la Transformada de Fourier (FFT). Al transformar la señal mediante FFT se pueden identificar las frecuencias contenidas en la señal en el dominio de la frecuencia, no obstante, con la FFT no es posible obtener las escalas y el ángulo de fase para construir la forma modal de cada frecuencia natural identificada, por lo que es necesario estimar los espectros de correlación cruzada.

El espectro correlacionado típico se muestra en la figura 3.142.

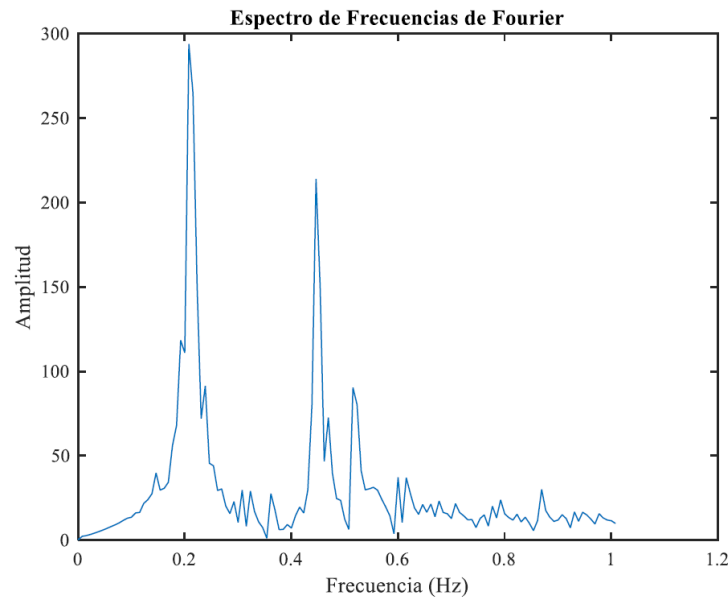


Figura 3.142 Espectro correlacionado

En las figuras 3.143 a 3.149 se muestran las variaciones de las frecuencias naturales del puente Mezcala desde la implementación del sistema de monitoreo, el valor mostrado por mes corresponde al promedio de todas las mediciones realizadas en dicho lapso de tiempo, las zonas resaltadas en rojo corresponden al periodo de mantenimiento a la carpeta asfáltica, durante el periodo de mantenimiento se realizó una medición complementaria utilizando acelerómetros, por lo que se ha adherido un subíndice “acc” al valor de frecuencia obtenido de las señales de aceleración, mientras que el subíndice “strain” es para el valor obtenido de los sensores de deformación.

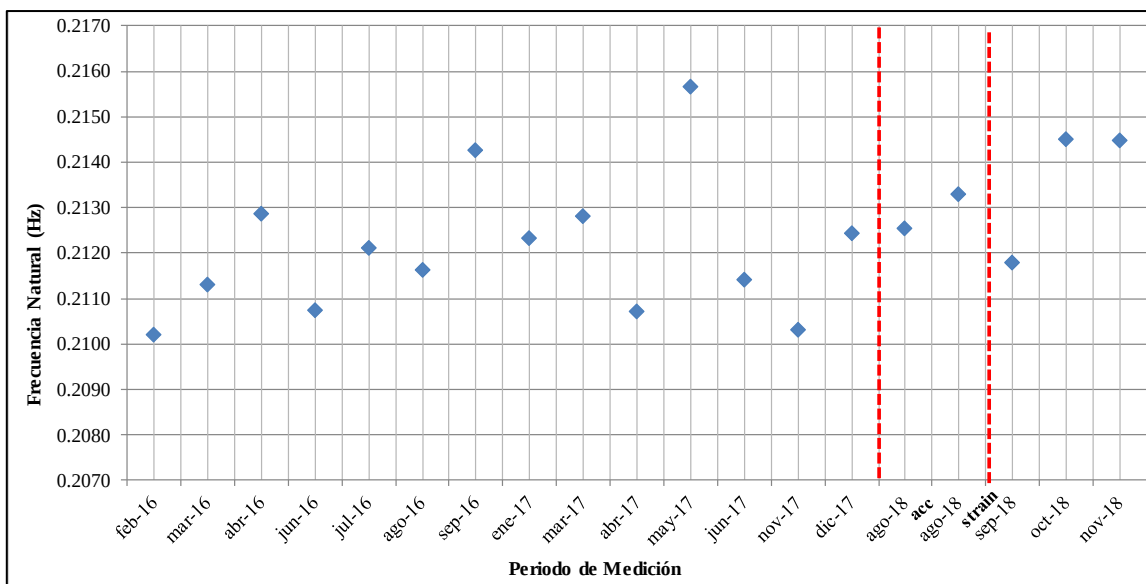


Figura 3.143 Variación de la frecuencia natural del modo 1

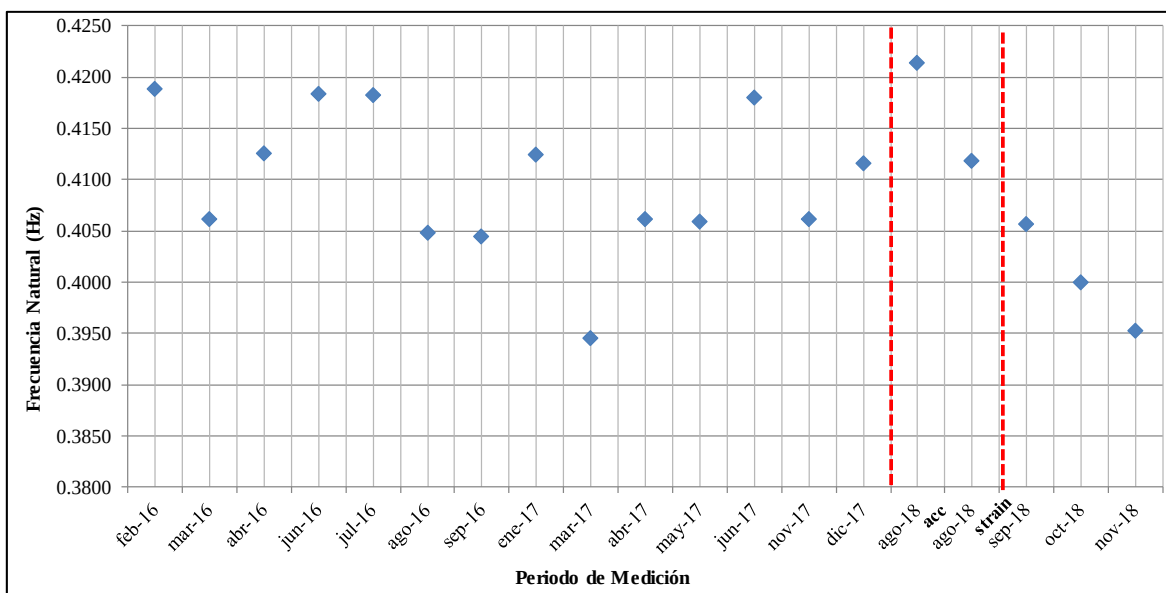


Figura 3.144 Variación de la frecuencia natural del modo 2

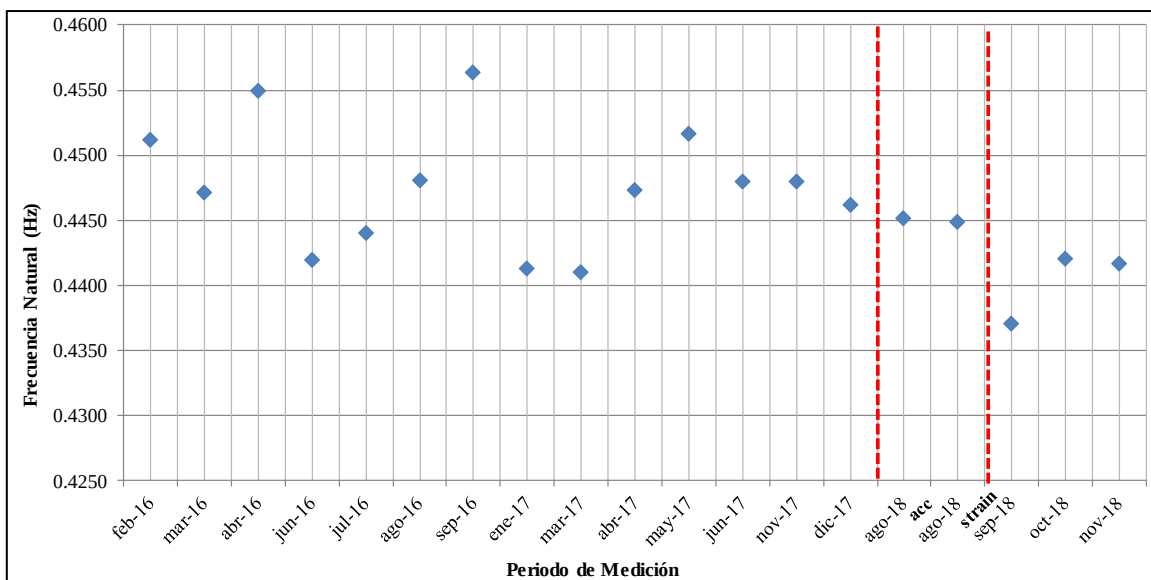


Figura 3.145 Variación de la frecuencia natural del modo 3

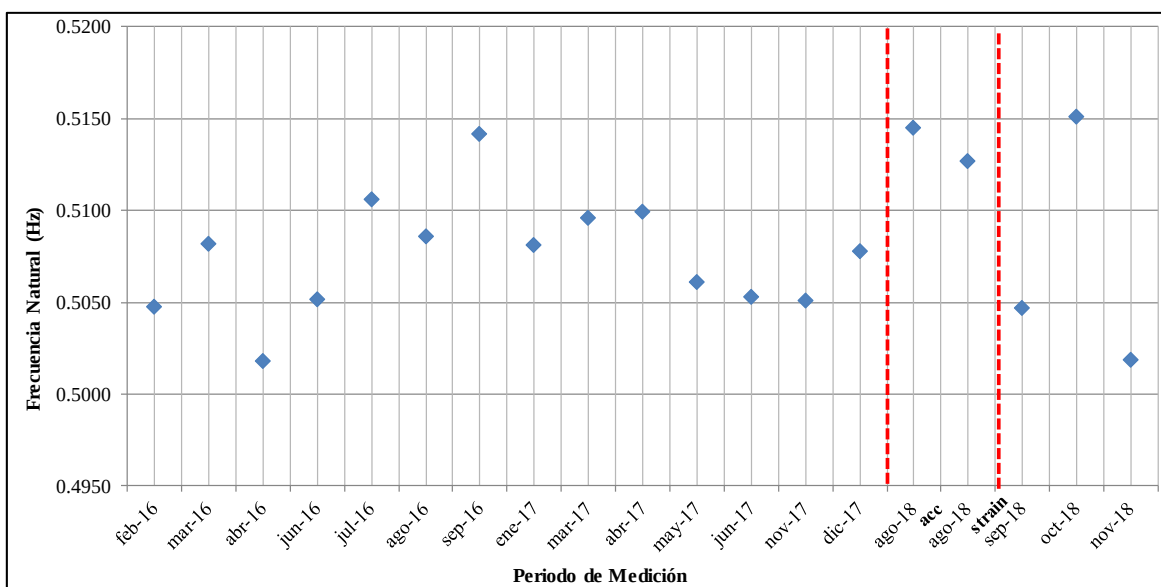


Figura 3.146 Variación de la frecuencia natural del modo 4

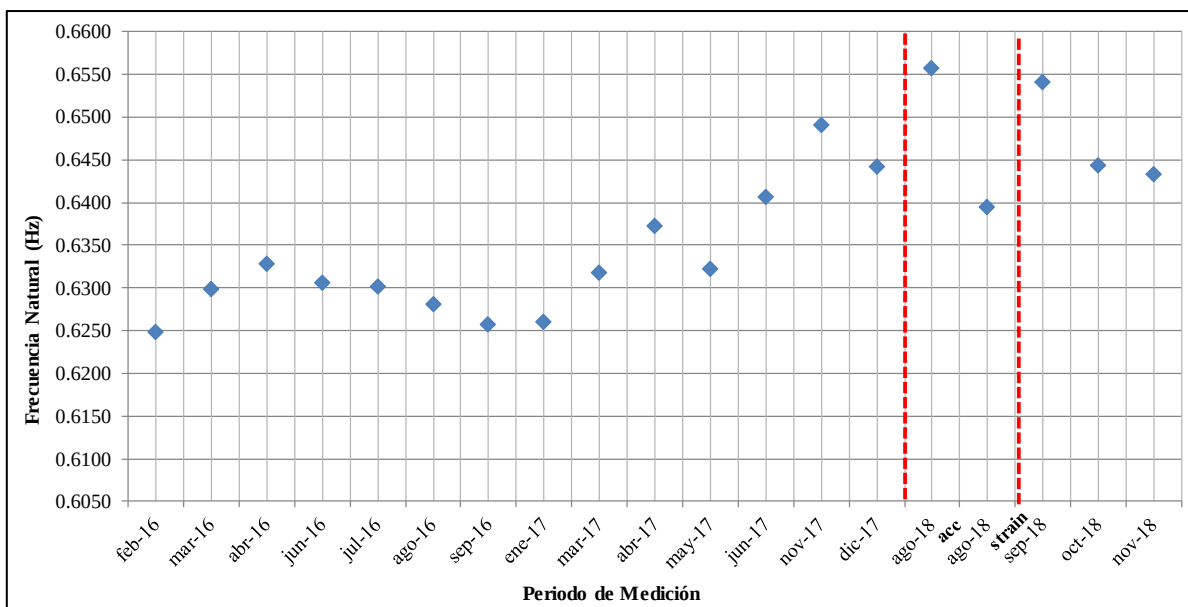


Figura 3.147 Variación de la frecuencia natural del modo 5

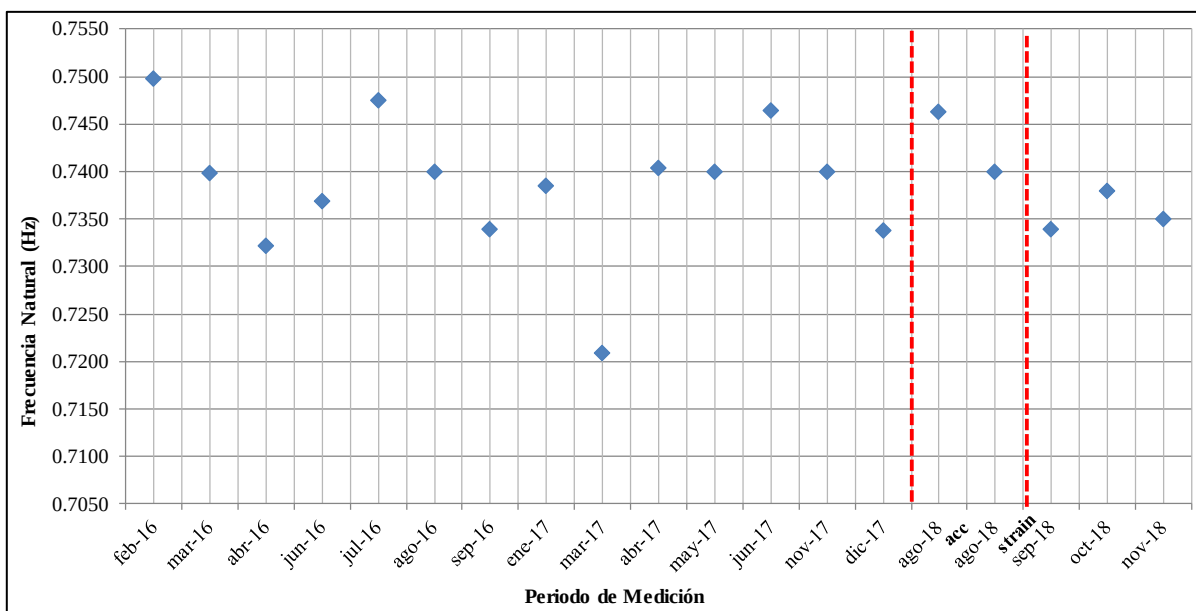


Figura 3.148 Variación de la frecuencia natural del modo 6

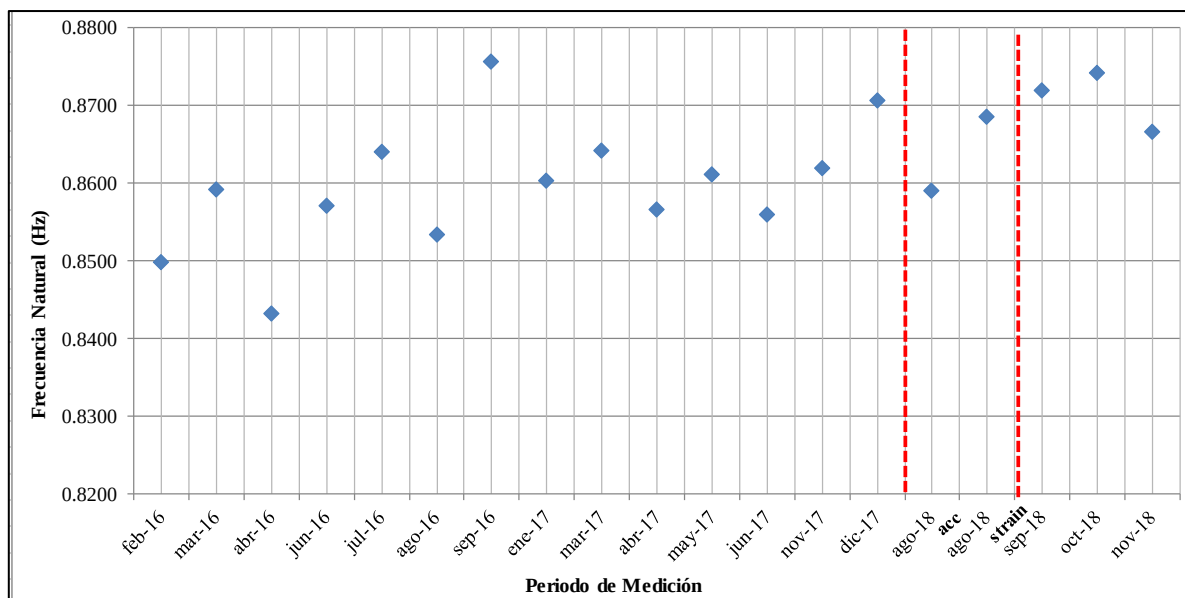


Figura 3.149 Variación de la frecuencia natural del modo 7

La máxima variación de las frecuencias naturales no sobrepasó el 3.5% por lo que se puede concluir que no se han presentado diferencias considerables y los cambios pueden ser atribuidos al efecto de los ciclos térmicos de la estructura y a las obras de mantenimiento de la carpeta asfáltica.

Las formas modales de deformación de los siete modos identificados se muestran en las figuras 3.150-3.156, las líneas punteadas representan las posiciones de las torres principales del puente.

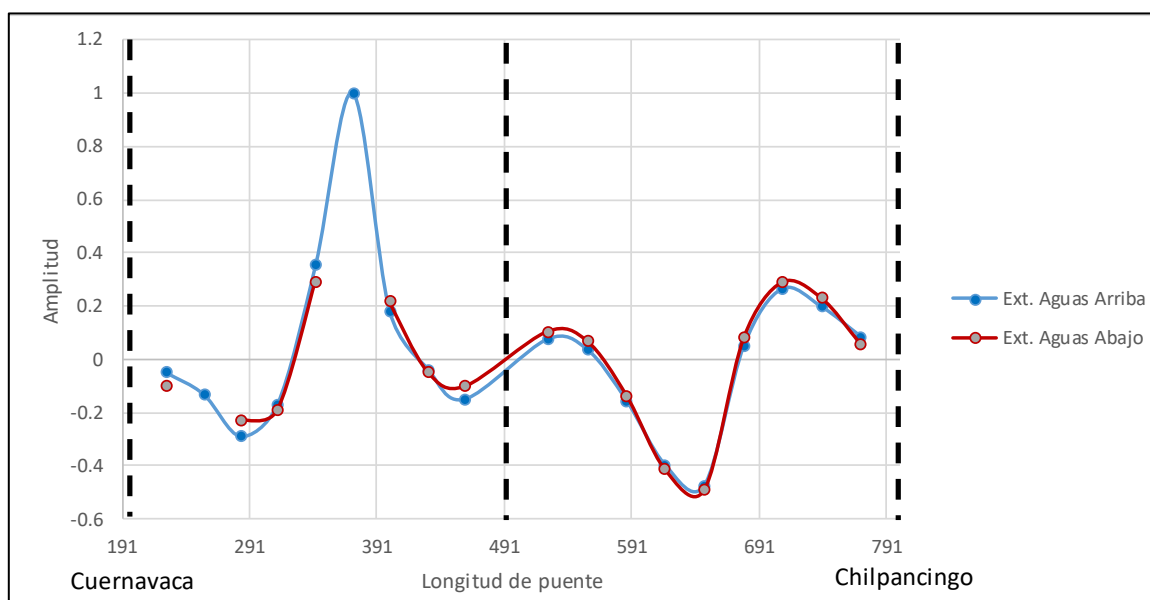


Figura 3.150 Forma modal de deformación del modo 1

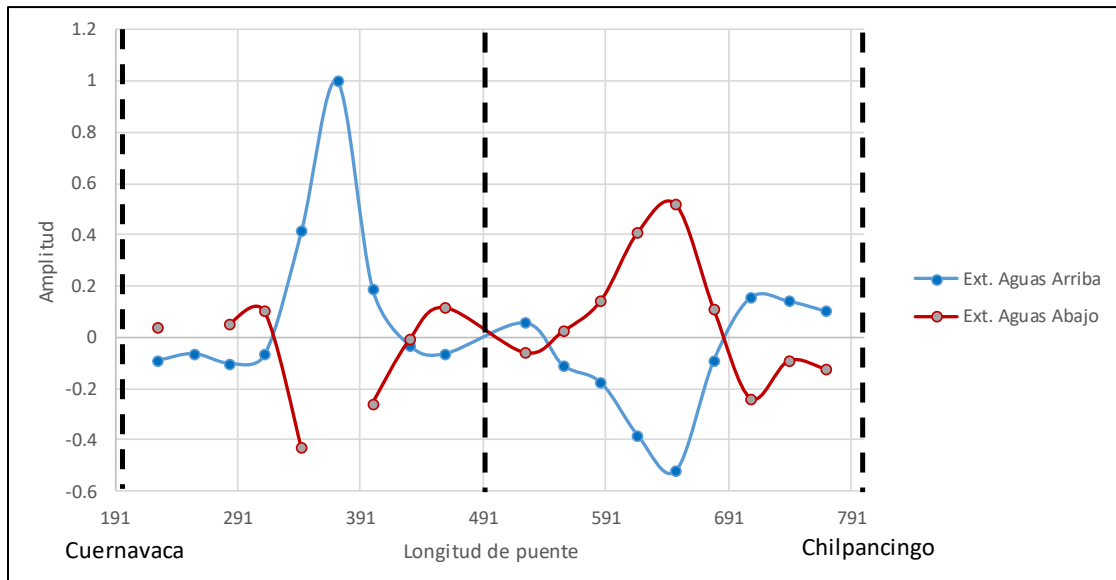


Figura 3.151 Forma modal de deformación del modo 2

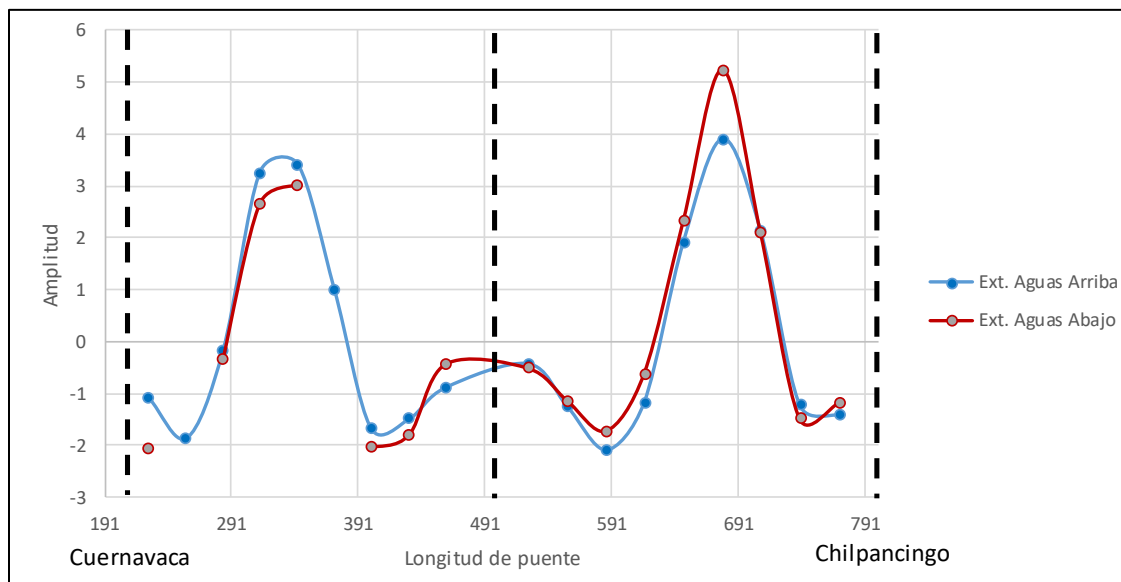


Figura 3.152 Forma modal de deformación del modo 3

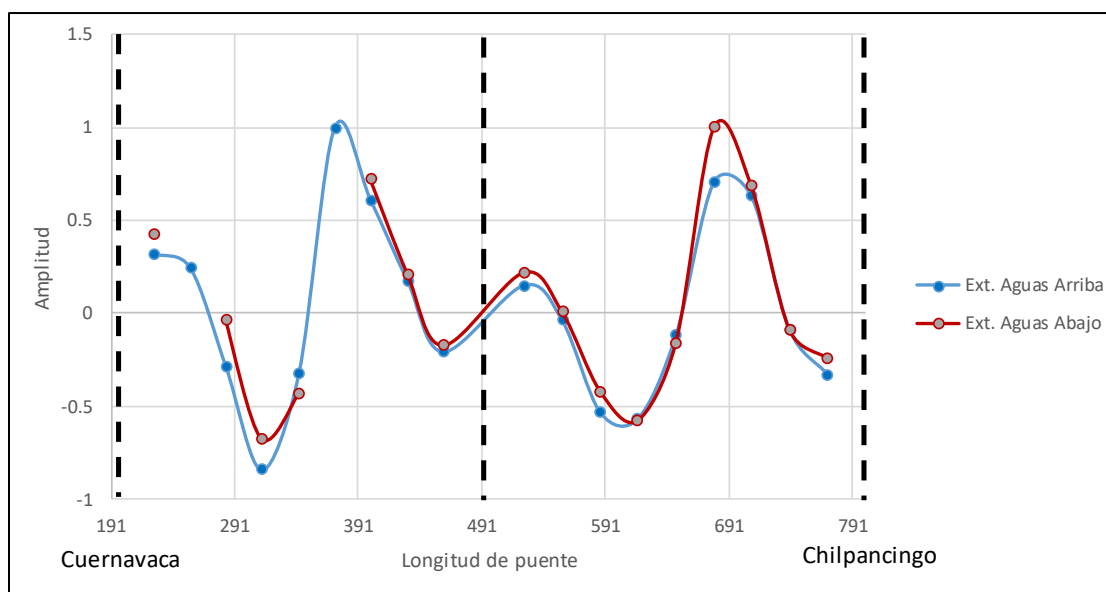


Figura 3.153 Forma modal de deformación del modo 4

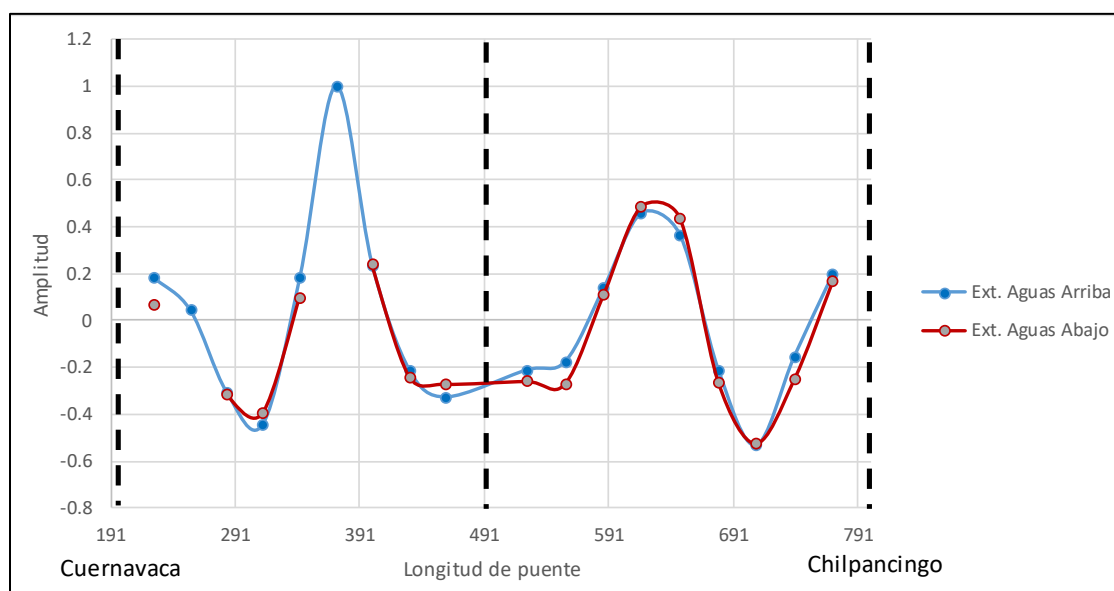


Figura 3.154 Forma modal de deformación del modo 5

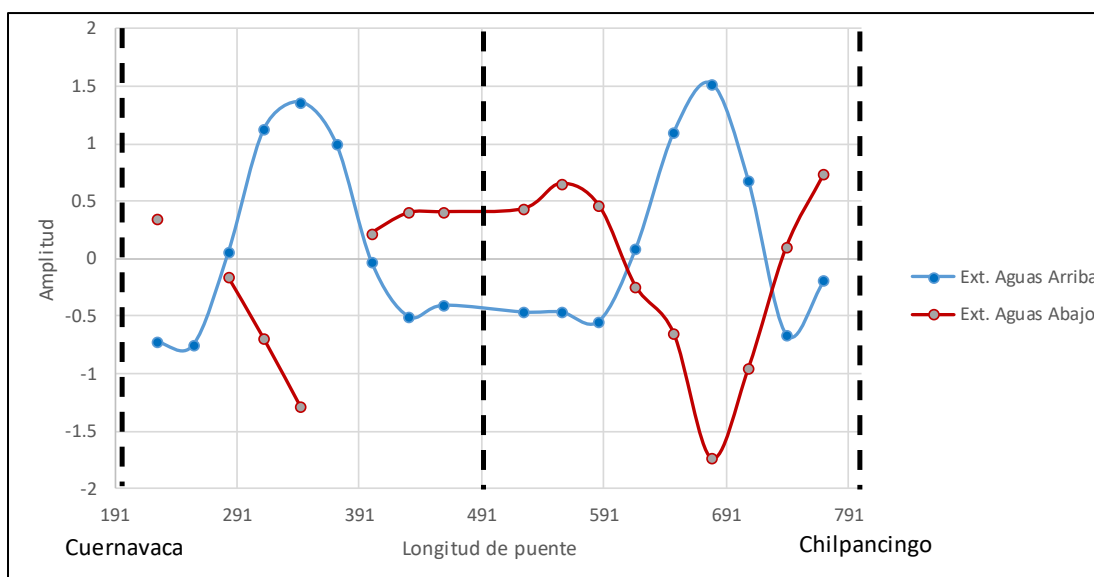


Figura 3.155 Forma modal de deformación del modo 6

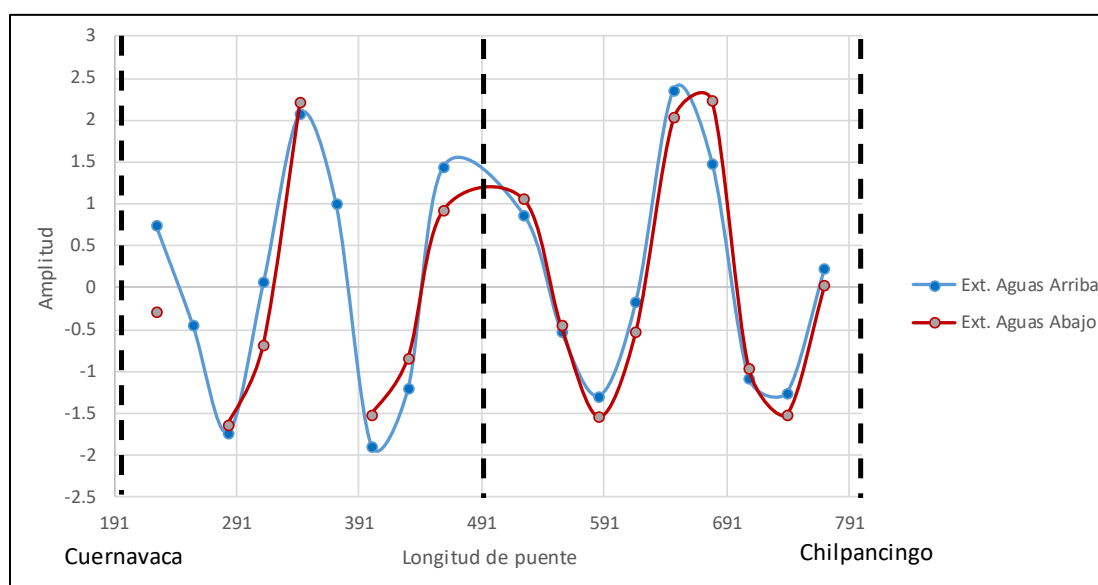


Figura 3.156 Forma modal de deformación del modo 7

De las formas modales de deformación se puede apreciar que cinco de los modos corresponden a la flexión del tablero mientras que los dos modos restantes son torsionales. En la tabla 2 se muestran los valores promedio de frecuencia de los siete modos identificados y su respectiva desviación estándar.

Tabla 3.1 Valores de los modos del puente Mezcala

Modo	Frecuencia promedio	Desv. Est.	Tipo
1	0.2125	0.0015	Flexión Tablero
2	0.4084	0.0078	Torsión Tablero
3	0.4460	0.0050	Flexión Tablero
4	0.5077	0.0040	Flexión Tablero
5	0.6349	0.0095	Flexión Tablero
6	0.7389	0.0065	Torsión Tablero
7	0.8614	0.0084	Flexión Tablero

4 Conclusiones

Del análisis de los datos del sistema de monitoreo realizado durante el año 2018, se puede concluir que el puente se encuentra en condiciones adecuadas de servicio y seguridad, aunque se tiene que inspeccionar las zonas correspondientes a los sensores B-EA-9 y B-EA-19 que son los centros de claro lado aguas arriba.

Con los datos obtenidos del sistema de monitoreo del puente Mezcala (deformaciones) se han identificado los 7 primeros modos de vibrar de la estructura, todas las respuestas dinámicas corresponden a excitación bajo condiciones de operación normal (viento y vehículos), por lo que no han sido requeridas pruebas dinámicas controladas en el puente para obtener sus parámetros modales.

Si bien, la variación de las frecuencias naturales no ha sido mayor al 3.5%, aún es necesario correlacionar la variación mensual de las frecuencias con los ciclos de temperatura del puente o con los eventos telúricos de la zona.

Con las frecuencias naturales identificadas y con los datos del sistema de monitoreo se puede dar seguimiento al comportamiento estructural del puente, de tal manera que cuando se identifiquen cambios en estos parámetros estructurales se implementen técnicas de evaluación y detección de daño con el fin evaluar la integridad de la estructura.

Bibliografía

1. López J. A., Carrión F. J., Quintana J. A., Samayoa D., Lomelí M. G., Orozco P. R., “*Verification of the Ultrasonic Qualification for Structural Integrity of partially Embedded Steel Elements*”, *Advances Materials Research*, , 65(2009), pp. 69-78, 2009.
2. Astiz M. A., “*Composite Construction in Cable-Stayed Bridge Towers*”, *International Conference on Composite Construction – Conventional and Innovative*, Conference Report, 16-18 September, Innsbruck, Austria, pp 127-132, 1997
3. Aguirre A., Carbajal J., “*Análisis en el Tirante 11 del Puente Papaloapan*”, *Corporación Mexicana de Investigación de Materiales S. A. de C. V.*, Reporte InternoAF-IFT/00087, Saltillo, Coahuila, México, 2000.
4. López A., Poblano C., “*Análisis de falla y Pruebas de Fatiga del Anclaje Desprendido del Tirante 11, Lado Agua, Torre 3, del Puente Río Papaloapan*”, *Instituto Mexicano del Transporte*, Reporte Interno, EQ001/00, Sanfandila, Querétaro, México, 2000.
5. ASTM, “*Standard Specification for Steel Castings, High Strength, for Structural Purposes*”, ASTM designation, A148/A 148M-93B (rev 98), West Conshohocken, PA, U. S. A., 2005.
6. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), “*Programa sectorial de comunicaciones y transportes*”, 2013.
7. Gobierno de la Republica, “*Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018*”, 2013
8. Carrión, F. J., López, J. A., Quintana, J. A., Guzmán, A. 2007. Nonlinear Assessment of Cable Vibration in a Stayed Bridge. *Experimental Mechanics*. Vol. 48. p.p. 153-161.
9. Cooley, J. W., Tukey, J. W. 1965. An algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Mathematics of Computation*. Vol. 19, pp. 297-311.
10. Amezquita-Sanchez, J.P., Garcia-Perez, A., Romero-Troncoso, R., Osornio-Rios, R., Herrera-Ruiz, G., 2013. High-resolution spectral-analysis for identifying the natural modes of a truss-type structure by means of vibrations. *J. Vib. Control* 19 (16), 2347–2356.



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

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