



ACTUALIZACIÓN Y SEGUIMIENTO DE LOS ÍNDICES DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DEL PUENTE RÍO PAPALOAPAN

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

Publicación Técnica No. 524
Sanfandila, Qro, 2018

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Actualización y seguimiento de los índices de
desempeño estructural del puente Río Papaloapan**

Publicación Técnica No. 524
Sanfandila, Qro, 2018

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. en C. Álvaro Martínez Trujano, el Ing. Miguel Anaya Díaz, el Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, el Lic. Héctor Miguel Gasca Zamora, el Ing. Jesús Iván Valenzuela Delgado y el Ing. Andrés Hernández Guzmán.

Este trabajo es el producto final del proyecto de investigación interna EI 02/17 “Actualización y seguimiento de los índices de desempeño estructural del puente Río Papaloapan”.

Agradecemos 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	xii
Sinopsis	xiii
Abstract	xv
Resumen ejecutivo	xvii
1 Introducción	1
2 Sistema de monitoreo puente Río Papaloapan.....	15
3 Seguimiento de los parámetros estructurales del puente Río Papaloapan..	23
Conclusiones.....	85
Bibliografía	87

Índice de figuras

Figura 1.1	Elemento de anclaje del tirante 1, semi-arpa 5 que falló	1
Figura 1.2	Sección de fractura del elemento de anclaje del tirante 1, semi-arpa 5	2
Figura 1.3	Registro de los extensómetros bajo la viga principal aguas arriba.	3
Figura 1.4	Respuesta del extensómetro al centro de la viga principal aguas arriba.	3
Figura 1.5	Respuesta de los inclinómetros en la torre 2 aguas arriba	4
Figura 1.6	Tensiones antes y después de la falla en la semi-arpa 5.....	4
Figura 1.7	Tensiones antes y después de la falla en la semi-arpa 6.....	5
Figura 1.8	Puntal de refuerzo temporal en la zona afectada por la falla	6
Figura 1.9	Deformaciones medidas por el sensor L2 durante la instalación del puntal.....	6
Figura 1.10	Tensiones en el tirante 2, semi-arpa 5 durante la instalación del puntal.....	7
Figura 1.11	Parámetros característicos de una señal acústica	8
Figura 1.12	Prueba de emisiones acústicas según ASTM-F2174	9
Figura 1.13	Prueba de tensión y probeta utilizada para simular condiciones de campo	9
Figura 1.14	Secuencia de ciclos de carga y descarga aplicados en la prueba de tensión	10
Figura 1.15	Procedimiento de colocación y fijación de sensores.....	10
Figura 1.16	Identificación de respuestas según su origen y zona.....	11
Figura 1.17	Gráfica del índice de severidad, de mayor a menor, para todos los elementos de anclaje.....	12
Figura 1.18	Gráfica del índice de severidad de los elementos de anclaje más críticos.....	13
Figura 2.1	Diagrama de instalación de los sensores de deformación de fibra óptica.	16
Figura 2.2	Diagrama de instalación de los sensores de deformación de fibra óptica.	17
Figura 2.3	Ubicación e identificación de los inclinómetros de fibra óptica....	17

Figura 3.2	Valores de deformación unitaria para el sensor R2	20
Figura 3.3	Valores de deformación unitaria para el sensor R3	21
Figura 3.4	Valores de deformación unitaria para el sensor R4	21
Figura 3.5	Valores de deformación unitaria para el sensor R5	22
Figura 3.6	Valores de deformación unitaria para el sensor R6	22
Figura 3.7	Valores de deformación unitaria para el sensor R7	23
Figura 3.8	Valores de deformación unitaria para el sensor R8	23
Figura 3.9	Valores de deformación unitaria para el sensor R9	24
Figura 3.10	Valores de deformación unitaria para el sensor R10	24
Figura 3.11	Valores de deformación unitaria para el sensor R11	25
Figura 3.12	Valores de deformación unitaria para el sensor R12	25
Figura 3.13	Valores de deformación unitaria para el sensor L1	26
Figura 3.14	Valores de deformación unitaria para el sensor L2	26
Figura 3.15	Valores de deformación unitaria para el sensor L3	27
Figura 3.16	Valores de deformación unitaria para el sensor L4	27
Figura 3.17	Valores de deformación unitaria para el sensor L5	28
Figura 3.18	Valores de deformación unitaria para el sensor L6	28
Figura 3.19	Valores de deformación unitaria para el sensor L7	29
Figura 3.20	Valores de deformación unitaria para el sensor L8	29
Figura 3.21	Valores de deformación unitaria para el sensor L9	30
Figura 3.22	Valores de deformación unitaria para el sensor L10	30
Figura 3.23	Valores de deformación unitaria para el sensor L11	31
Figura 3.24	Valores de deformación unitaria para el sensor L12	31
Figura 3.25	Valores de inclinación en el plano YZ del sensor R1Y	32
Figura 3.26	Valores de inclinación en el plano YZ del sensor R2Y	33
Figura 3.27	Valores de inclinación en el plano XZ del sensor R2X	33
Figura 3.28	Valores de inclinación en el plano YZ del sensor L1Y	34
Figura 3.29	Valores de inclinación en el plano XZ del sensor L2X	34
Figura 3.30	Valores de inclinación en el plano YZ del sensor L2Y	35
Figura 3.32	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 1	37
Figura 3.33	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 2	37
Figura 3.34	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 2	38
Figura 3.35	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 3	38

Figura 3.36	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 3	39
Figura 3.37	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 4	39
Figura 3.38	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 4	40
Figura 3.39	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 5	40
Figura 3.40	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 5	41
Figura 3.41	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 6	41
Figura 3.43	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 7	42
Figura 3.44	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 7	43
Figura 3.45	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 8	43
Figura 3.46	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 8	44
Figura 3.47	Semi-arpa 1	46
Figura 3.48	Semi-arpa 2	46
Figura 3.49	Semi-arpa 3	47
Figura 3.50	Semi-arpa 4	47
Figura 3.51	Semi-arpa 5	48
Figura 3.52	Semi-arpa 6	48
Figura 3.53	Semi-arpa 7	49
Figura 3.54	Semi-arpa 8	49
Figura 3.55	Media estadística del extensómetro R1 a tensión.....	50
Figura 3.56	Media estadística del extensómetro R1 a compresión.....	51
Figura 3.57	Media estadística del extensómetro R2 a tensión.....	51
Figura 3.58	Media estadística del extensómetro R2 a compresión.....	52
Figura 3.59	Media estadística del extensómetro R3 a tensión.....	52
Figura 3.60	Media estadística del extensómetro R3 a compresión.....	53
Figura 3.61	Media estadística del extensómetro R4 a tensión.....	53
Figura 3.62	Media estadística del extensómetro R4 a compresión.....	54
Figura 3.63	Media estadística del extensómetro R5 a tensión.....	54
Figura 3.64	Media estadística del extensómetro R5 a compresión.....	55
Figura 3.65	Media estadística del extensómetro R6 a tensión.....	55
Figura 3.66	Media estadística del extensómetro R6 a compresión.....	56
Figura 3.67	Media estadística del extensómetro R7 a tensión.....	56
Figura 3.68	Media estadística del extensómetro R7 a compresión.....	57
Figura 3.69	Media estadística del extensómetro R8 a tensión.....	57

Figura 3.70	Media estadística del extensómetro R8 a compresión.....	58
Figura 3.71	Media estadística del extensómetro R9 a tensión.....	58
Figura 3.72	Media estadística del extensómetro R9 a compresión.....	59
Figura 3.73	Media estadística del extensómetro R10 a tensión.....	59
Figura 3.74	Media estadística del extensómetro R10 a compresión.....	60
Figura 3.75	Media estadística del extensómetro R11 a tensión.....	60
Figura 3.76	Media estadística del extensómetro R11 a compresión.....	61
Figura 3.77	Media estadística del extensómetro R12 a tensión.....	61
Figura 3.78	Media estadística del extensómetro R12 a compresión.....	62
Figura 3.79	Media estadística del extensómetro L1 a tensión	62
Figura 3.80	Media estadística del extensómetro L1 a compresión	63
Figura 3.81	Media estadística del extensómetro L2 a tensión	63
Figura 3.82	Media estadística del extensómetro L2 a compresión	64
Figura 3.83	Media estadística del extensómetro L3 a tensión	64
Figura 3.84	Media estadística del extensómetro L3 a compresión	65
Figura 3.85	Media estadística del extensómetro L4 a tensión	65
Figura 3.86	Media estadística del extensómetro L4 a compresión	66
Figura 3.87	Media estadística del extensómetro L5 a tensión	66
Figura 3.88	Media estadística del extensómetro L5 a compresión	67
Figura 3.89	Media estadística del extensómetro L6 a tensión	67
Figura 3.90	Media estadística del extensómetro L6 a compresión	68
Figura 3.91	Media estadística del extensómetro L7 a tensión	68
Figura 3.92	Media estadística del extensómetro L7 a compresión	69
Figura 3.93	Media estadística del extensómetro L8 a tensión	69
Figura 3.94	Media estadística del extensómetro L8 a compresión	70
Figura 3.95	Media estadística del extensómetro L9 a tensión	70
Figura 3.96	Media estadística del extensómetro L9 a compresión	71
Figura 3.97	Media estadística del extensómetro L10 a tensión	71
Figura 3.98	Media estadística del extensómetro L10 a compresión	72
Figura 3.99	Media estadística del extensómetro L11 a tensión	72
Figura 3.100	Media estadística del extensómetro L11 a compresión	73
Figura 3.101	Media estadística del extensómetro L12 a tensión	73
Figura 3.102	Media estadística del extensómetro L12 a compresión	74

Figura 3.103	Señales dinámicas de deformación producto de vibraciones ambientales.....	75
Figura 3.104	Señal dinámica de un extensómetro producto de vibración ambiental	75
Figura 3.105	Espectro de Fourier para la señal de deformación.	76
Figura 3.106	Espectro de MUSIC para la señal de deformación.	76
Figura 3.107	Forma modal del primer modo de vibración.....	77
Figura 3.108	Forma modal del segundo modo de vibración	77
Figura 3.109	Forma modal del tercer modo de vibración.....	78
Figura 3.110	Respuesta dinámica de aceleración con vibración ambiental.....	78
Figura 3.111	Espectro de Fourier para la respuesta dinámica de aceleración.....	79
Figura 3.112	Espectro de MUSIC de la señal dinámica de aceleración.....	79
Figura 3.113	Forma modal del primero modo.....	80
Figura 3.114	Forma modal del segundo modo.	80
Figura 3.115	Forma modal del tercer modo.	81
Figura 3.116	Forma modal del primer modo (Flexión del tablero)	81
Figura 3.117	Forma modal del segundo modo (Flexión del tablero)	82
Figura 3.118	Forma modal del tercer modo (Torsión del tablero)	82

Índice de tablas

Tabla 2.1	Sistema de monitoreo instalado en el puente Río Papaloapan	15
Tabla 3.1	Tensión en los tirantes del Puente Río Papaloapan finales	45
Tabla 3.2	Frecuencias naturales del Puente Río Papaloapan	83

Sinopsis

El puente Río Papaloapan es uno de los tres puentes atirantados que el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CMPEI) del Instituto Mexicano del Transporte tiene monitoreado permanentemente y en tiempo real. El puente ha sido monitoreado desde el año 2013; y a partir de la información obtenida del sistema de monitoreo, ha sido posible evaluar la condición estructural, ajustar y calibrar modelos matemáticos, establecer estrategias de mantenimiento y de operación bajo condiciones de seguridad, evaluar el mantenimiento realizado, cambiar o modificar procesos de mantenimiento y analizar en el 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 Río Papaloapan durante el año 2017 y una vez concluido el mantenimiento de los elementos de sujeción efectuado entre el año 2015 y 2016.

(Palabras clave: *monitoreo estructural, puentes, parámetros estructurales*)

Abstract

The Río Papaloapan stayed bridge is one of the three cable-stayed bridges that the Intelligent Bridges and Structures Monitoring Center (CMPEI) of the Mexican Transportation Institute has permanently monitored in real time. The bridge has been monitored since 2013, and due to the information provided by monitoring system, has been possible to evaluate its structural integrity, to adjust and to calibrate mathematical models, to establish maintenance and operation strategies with safety conditions, to evaluate preventive maintenance, to change or to modify maintenance processes and to analyze structural integrity after the occurrence of natural phenomena.

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 Río Papaloapan stayed bridge during the year 2017 and once the preventive maintenance of the anchoring elements were completed between 2015 and 2016.

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

Resumen ejecutivo

A principios del año 2013 se instrumentó el puente Río Papaloapan y comenzó su evaluación estructural con el objetivo de garantizar la integridad estructural y la seguridad de los usuarios. Desde el comienzo del monitoreo se han identificado parámetros estructurales, identificado los rangos de operación de cada uno de ellos bajo condiciones de operación normal, se han establecido niveles de alarma y ajustado modelos matemáticos.

La información 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.

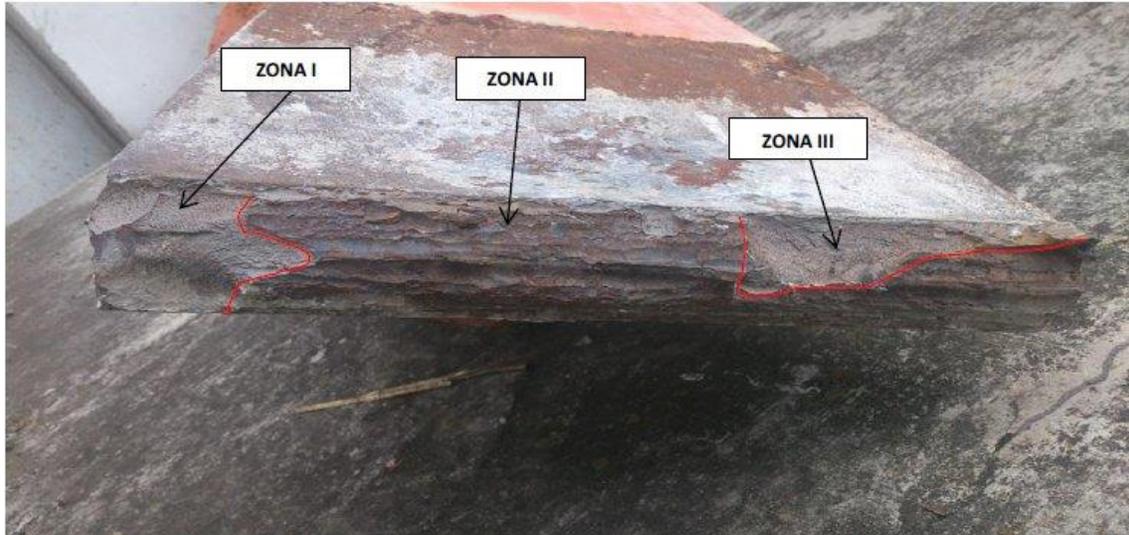
Este trabajo presenta resultados de la actualización y seguimiento de los índices de desempeño estructural del puente Río Papaloapan.

1 Introducción

El 10 de junio de 2015 se presentó la ruptura del elemento de anclaje superior del tirante 1, semi-arpa 5 (torre 2, aguas arriba, lado tierra) del puente Río Papaloapan (figuras 1 y 2). En el año 2000, este puente ya había reportado la falla del elemento de anclaje superior del tirante 11 de la semi-arpa 7 (torre 3, aguas arriba, lado agua), que después de un análisis de falla se determinó que la causa fueron deficiencias en el material constitutivo [1]. Entre las características principales del material deficiente estaba la microestructura de grano grande, que lo hacía sumamente frágil que, en conjunción con la gran cantidad de poros e inclusiones que contenía la pieza por ser de fundición, resultó particularmente sensible a fallar por fatiga y que fue la causa por la que se desencadenó la ruptura después de seis años de servicio. Para prevenir la falla de algún otro elemento de anclaje del puente, el Instituto Mexicano del Transporte desarrolló una técnica de inspección no destructiva por ultrasonido; lo que permitió distinguir aquellas piezas con microestructura semejante a la que falló, respecto a una microestructura de grano fino [2]; esto dio como resultado la identificación de 16 piezas “estructuralmente deficientes”, 14 con grano grande y dos con gran contenido de poros. Ante este resultado y basados en un estudio técnico-económico [3], Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE), decidió sustituir 20 elementos de anclaje superior del puente Río Papaloapan; los 16 ya identificados en el estudio anterior y cuatro piezas elegidas al azar para obtener una muestra representativa del resto para un estudio probabilístico de confiabilidad estructural del puente [4].



Figura 1.1 Elemento de anclaje del tirante 1, semi-arpa 5 que falló.



**Figura 1.2 Sección de fractura del elemento de anclaje del tirante 1, semi-
arpa 5**

Ya rehabilitado el puente, se esperaba que no ocurrieran fallas en por lo menos 20 años a partir de 2009, fecha que se tomó como referencia para el estudio de confiabilidad, pero la falla ocurrió tan solo después de 6 años.

Al realizarse el análisis de falla del elemento fracturado en 2015, se concluyó que en esta ocasión la causa principal había sido una deficiente soldadura que muy probablemente fue aplicada con baja temperatura que impidió una adecuada fusión entre el material y la soldadura [5], generando una zona de concentración de esfuerzos que eventualmente desarrolló una grieta que llegó a la falla después de 20 años de servicio. Al analizar la figura 2, es fácil distinguir dos zonas en la superficie de fractura, una muy brillante (zonas I y III) que corresponden a la zona de fractura final por sobrecarga y una zona oscurecida por la oxidación por exposición al aire y agua por algún tiempo, que corresponde a la grieta que evolucionó en el tiempo por fatiga (zona II). Cabe mencionar que para llegar a la falla tuvo que desarrollar una grieta de aproximadamente el 60% de la sección transversal de la pieza; lo que permite concluir que la capacidad estructural del material sería excelente si se hubiera controlado adecuadamente el proceso de soldadura y no se hubiera presentado la zona con falta de fusión que desarrolló una grieta por fatiga.

Debido a que este puente cuenta con sistema de monitoreo continuo, fue posible analizar su comportamiento antes, durante y después de la falla; del cual se obtuvo la siguiente información:

I. La falla ocurrió a las 07:35:04 am del 10 junio de 2016, después de que pasó un vehículo de carga a una velocidad de 60 km/h (figura 3) y, por la magnitud de la respuesta y basados en la estadística de mediciones por dos años, se estima que el peso del vehículo sobrepasa el 99.98 percentil; es decir, que existe un 0.02% de probabilidad de que un vehículo con ese peso circule por el puente (figura 4).

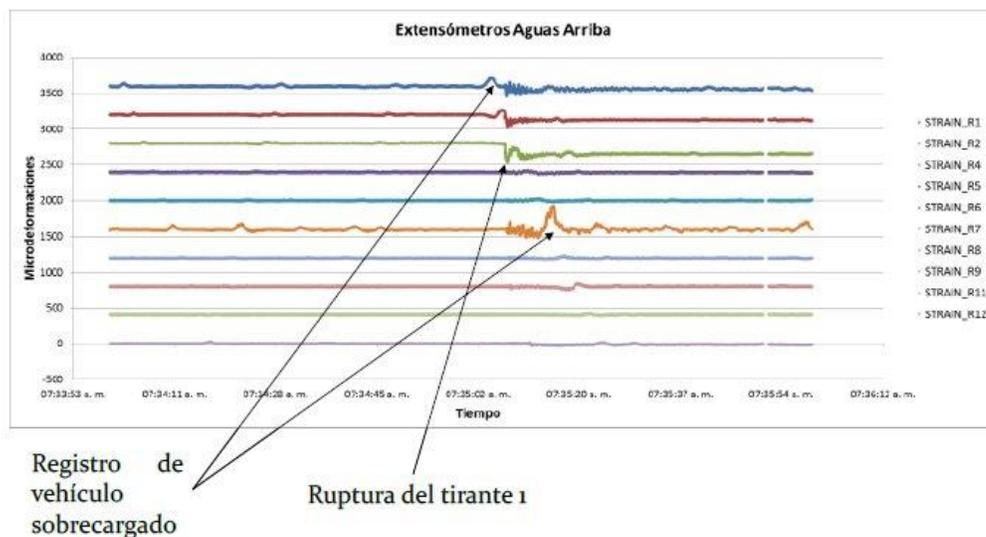


Figura 1.3 Registro de los extensómetros bajo la viga principal aguas arriba.

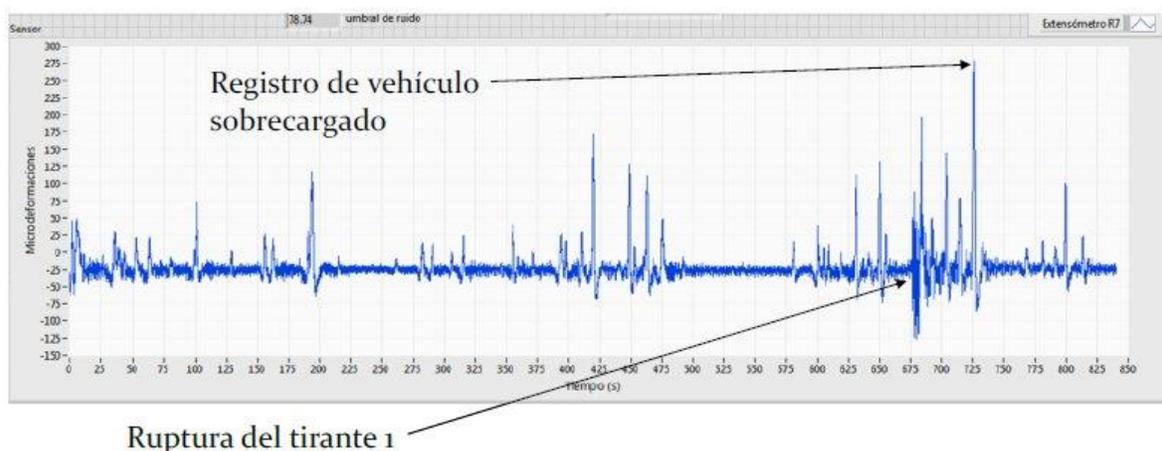


Figura 1.4 Respuesta del extensómetro al centro de la viga principal aguas arriba.

II. Se midió la respuesta dinámica del puente y se observa recuperación de la estructura en muy poco tiempo (figura 5). En general, no se observó mayor daño que el del elemento de anclaje mismo; sin embargo, al evaluar las tensiones (figuras 6 y 7) se observa que el incremento en la tensión del tirante 1 de la semi-arpa 6 (torre 2, aguas arriba, lado agua), es de casi 50 toneladas, por encima del máximo de diseño; lo que pone en riesgo la integridad de ese mismo tirante. El resto de los tirantes contiguos al que falló se mantienen por debajo del máximo de diseño.

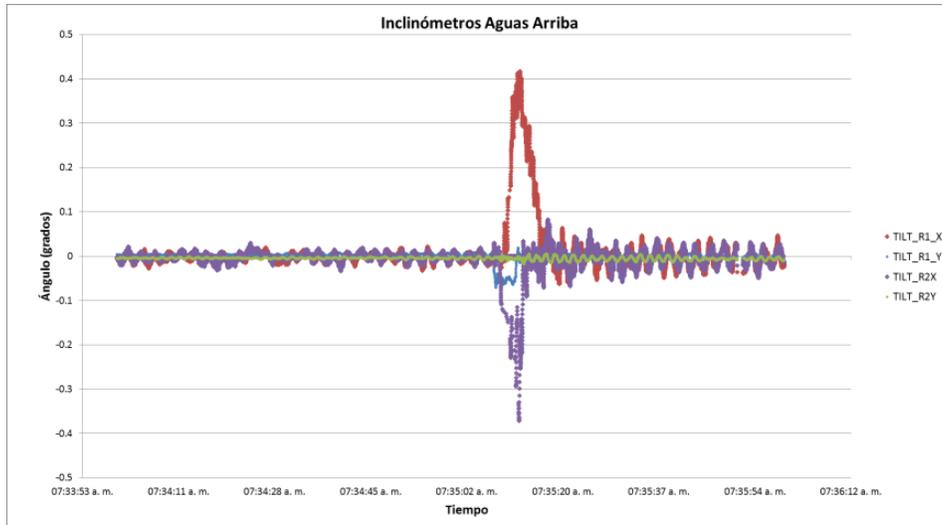


Figura 1.5 Respuesta de los inclinómetros en la torre 2 aguas arriba

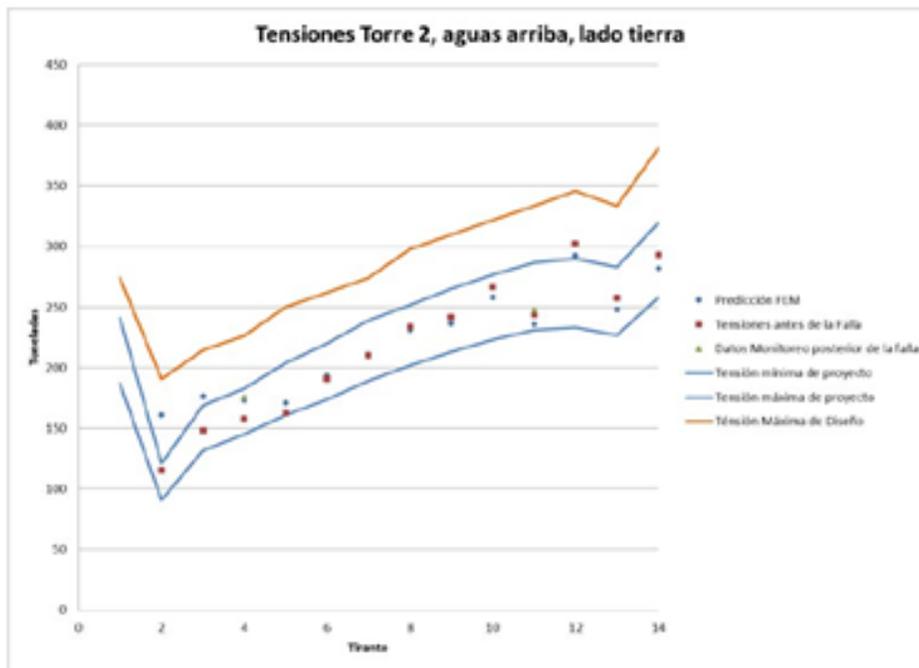


Figura 1.6 Tensiones antes y después de la falla en la semi-arpa 5

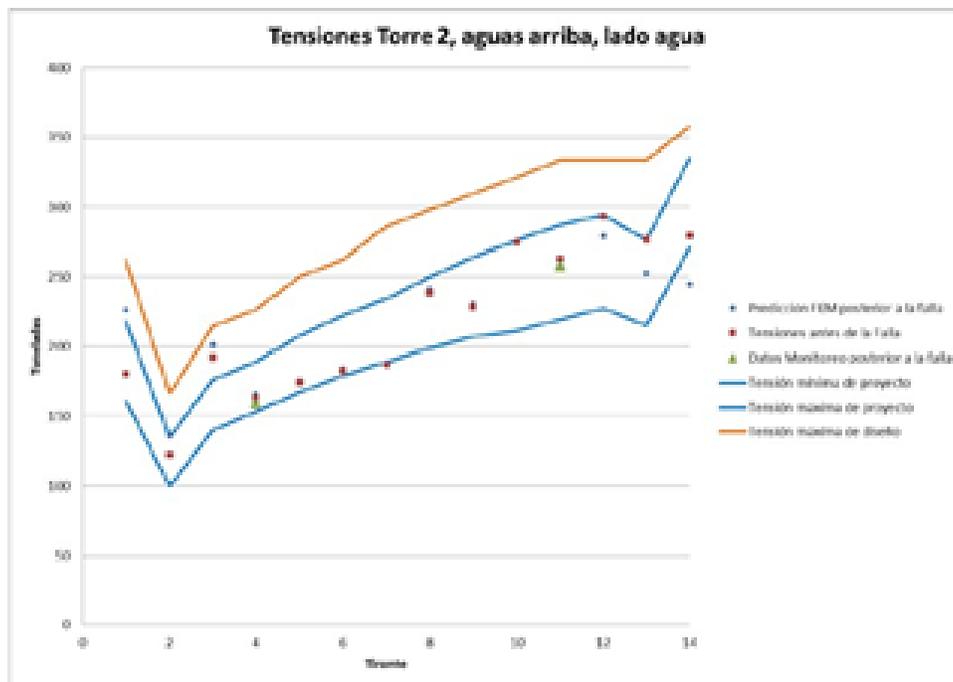


Figura 1.7 Tensiones antes y después de la falla en la semi-arpa 6

Con base en lo anterior, en muy poco tiempo y con datos concretos obtenidos del sistema de monitoreo, fue posible recomendar a CAPUFE que restringiera el tránsito vehicular del cuerpo A por exclusivamente el carril de alta velocidad, y dejara libre el de baja velocidad para limitar al máximo las cargas en los tirantes sobrecargados. Al mismo tiempo, se sugirió limitar la velocidad de circulación sobre el puente para reducir cargas dinámicas. Finalmente, se sugirió instalar un sistema de soporte por debajo del anclaje inferior del tirante 1 que falló, para recuperar en lo posible la pérdida del tirante y aliviar los tirantes contiguos. Esta sugerencia llevó a instalar un puntal temporal de soporte, antes de rehabilitar el tirante (figura 8).

Dentro de las actividades que el IMT desarrolló durante el proyecto de rehabilitación, estuvo el monitoreo del puente durante eventos especiales; como la instalación el puntal, el destensado y tensado de tirantes, o cualquier actividad que alterara la condición del puente. De esta manera, se monitorearon las tensiones de los tirantes y las deformaciones de los sensores contiguos al punto donde fue instalado el puntal (figuras 9 y 10).



Figura 1.8 Puntal de refuerzo temporal en la zona afectada por la falla



Figura 1.9 Deformaciones medidas por el sensor L2 durante la instalación del puntal

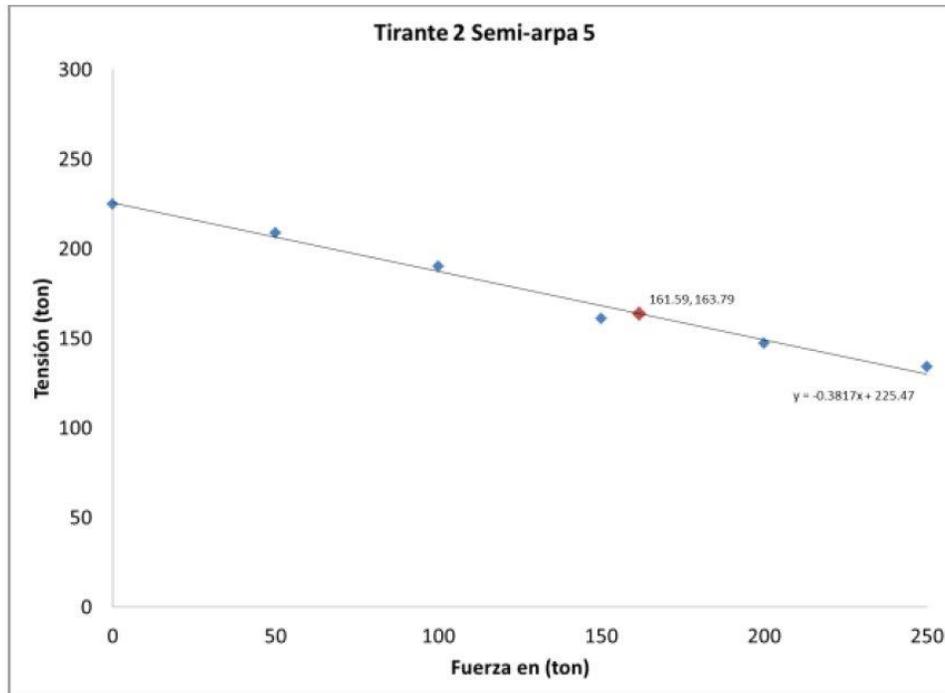


Figura 1.10 Tensiones en el tirante 2, semi-arpa 5 durante la instalación del puntal

Del monitoreo de las tensiones de los tirantes durante la instalación del puntal, fue posible estimar la carga final que este soportaba a través de la correlación lineal de las cargas aplicadas por el gato hidráulico, antes de instalar el neopreno y después de que se instaló el neopreno y se liberó el gato. De esta manera, se concluyó que la carga soportada por el puntal era de entre 150 y 160 toneladas.

El monitoreo periódico de las tensiones de los tirantes permitió confirmar que no había variaciones en su distribución, excepto cuando se destensaron o tensaron los cables. Además, se confirmó nuevamente que los efectos de los tirantes son locales y afectan únicamente cuatro o cinco tirantes contiguos del mismo lado únicamente.

Para inspeccionar las soldaduras embebidas en el concreto de los elementos de anclaje del puente Río Papaloapan, se propuso utilizar la técnica de emisiones acústicas, la cual es una técnica de inspección no destructiva que se basa en el principio físico de que las microgrietas y defectos en un material sometido a esfuerzos, emiten pulsos acústicos producto del crecimiento de grietas o de efectos de fricción entre las caras de estas. Por su naturaleza, la técnica debe ser evaluada con sumo cuidado para distinguir las emisiones por el crecimiento o la fricción de grietas respecto a emisiones producidas por otros efectos no deseados o ruido externo.

Las señales de emisión acústica son registradas mediante transductores piezoeléctricos que, colocados sobre la superficie del elemento por evaluar, para garantizar el acoplamiento del transductor con la pieza que es inspeccionada

mediante un fluido o grasa que permite la transmisión de la señal al transductor y que compensa los efectos de rugosidad de las dos superficies de acoplamiento.

La caracterización de una señal acústica (hit acústico) se realiza mediante los parámetros de amplitud (en unidades de mV o dB), tiempo de incremento (que es el tiempo que transcurre entre el pase del umbral y la máxima amplitud), duración, intensidad de señal, frecuencia promedio de señal, número de cuentas (corresponde al número de veces que excede el umbral) y energía (figura 11). Cuando se analiza la respuesta de una medición, además de caracterizar cada emisión (hit), se contabiliza el número de emisiones o “hits”, para identificar la razón de crecimiento de una grieta.

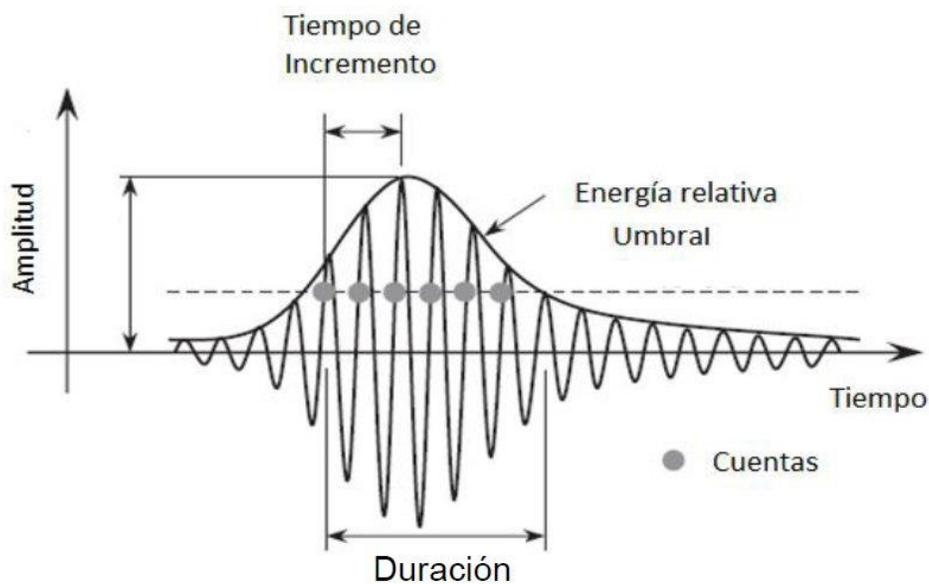


Figura 1.11 Parámetros característicos de una señal acústica

Para una correcta interpretación de las emisiones acústicas, es necesario diseñar y realizar un proceso de calibración adecuado al caso específico; para ello, se realizaron diferentes pruebas de evaluación. La primera prueba se realiza de acuerdo con la norma ASTM-F2174 Standard Practice for Verifying Acoustic Emission Sensor Response, la cual es utilizada para verificar el adecuado funcionamiento del sistema de medición y que en nuestro caso permitió replicar las condiciones de campo en laboratorio y establecer un primer nivel de calibración (figura 12). De igual manera, aplicando la señal de excitación en distintos puntos, según la norma, se pudieron evaluar los efectos de atenuación en el material.



Figura 1.12 Prueba de emisiones acústicas según ASTM-F2174

Para la segunda prueba, se fabricó una probeta con el mismo tipo de acero de la placa (A50) y del elemento de anclaje (AISI 1045); la cual fue soldada de manera que tuviera defectos internos para simular las condiciones de un elemento de anclaje superior con defectos en la soldadura. Posteriormente, esta probeta fue sometida a tensión con cargas controladas y se fueron registrando las respuestas por emisiones acústicas para identificar las características de las señales (frecuencias, amplitud) y calibrar el método (umbral, tiempo de incremento, duración) (figuras 13 y 14).



Figura 1.13 Prueba de tensión y probeta utilizada para simular condiciones de campo

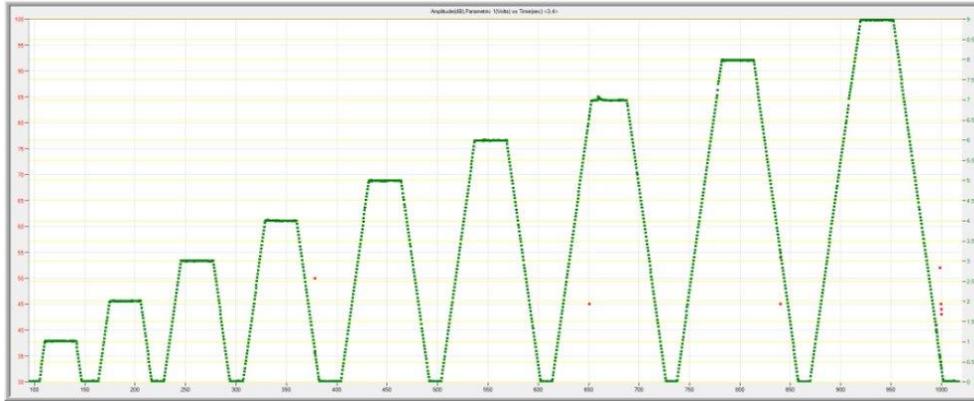


Figura 1.14 Secuencia de ciclos de carga y descarga aplicados en la prueba de tensión

Una vez establecidos los parámetros de calibración en el laboratorio, se realizó una prueba en campo para probar tanto el procedimiento de fijación y acoplamiento, como el procedimiento de calibración con los parámetros establecidos. Es importante hacer notar que se utilizaron dos sensores por elemento de anclaje, uno de alta frecuencia y otro de baja frecuencia, esto con el objetivo de evaluar las respuestas en dos rangos de frecuencia distintos (figura 15).



Figura 1.15 Procedimiento de colocación y fijación de sensores

El equipo utilizado cuenta con dieciséis canales de instrumentación, por lo que fue posible hacer mediciones simultáneas en ocho elementos de anclaje. Debido a esto, los trabajos de inspección en cada torre se planearon en cuatro etapas para cubrir el total de veintiocho elementos de anclaje, correspondiente a dos semi-arpas, en cada torre; ya sea aguas arriba o aguas abajo. Las inspecciones se planearon para medir durante un periodo de trece horas continuas, a partir de las 6 pm de un día, para concluir a las 7 am del día siguiente. Se seleccionó este intervalo de tiempo

porque en la noche es cuando circulan sobre el puente la mayor cantidad de vehículos de carga y, normalmente, con mayor nivel de carga; por lo tanto, ello garantizaba el mayor número de ciclos de cargas y favorecer el mayor número de emisiones.

Una vez registradas las emisiones acústicas de una torre (veintiocho elementos de anclaje), se procedió al análisis de los datos en el laboratorio. Este complejo proceso, por el gran número de datos registrados, se resume en las gráficas de amplitud-duración, una para cada elemento de anclaje. En cada gráfica se indican todos los eventos registrados en su correspondiente elemento de anclaje, para representar cada evento por su amplitud y frecuencia.

En general, existen tres tipos de eventos que se registran por emisiones acústicas y las gráficas de amplitud-duración son útiles para clasificarlas de acuerdo con su origen (figura 16), respuesta asociada a fenómenos de fricción (zona III), respuesta asociada con el desarrollo de defectos menores (zona I) y respuesta asociada con el crecimiento de grietas (zona II).

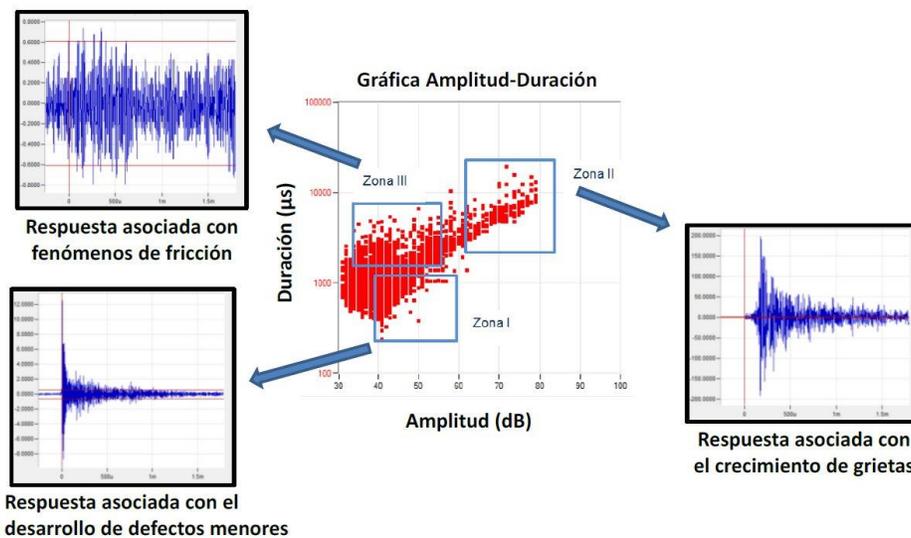


Figura 1.16 Identificación de respuestas según su origen y zona

Para establecer un criterio cuantitativo que califique la condición de un elemento de anclaje, se definió un índice de severidad [8], el cual básicamente promedia la energía acústica de los cincuenta eventos de mayor duración y frecuencia registrados y que representan los casos más críticos.

El índice de severidad se define como:

$$S_r = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{n=50} S_{oi} \quad (1.1)$$

En este caso, S_{0i} , es la energía acústica total registrada en el i -ésimo evento.

El análisis de los índices de severidad queda resumido en la gráfica de la figura 17. La línea que divide las zonas de severidad corresponde al valor promedio del índice de severidad de los 111 elementos de anclaje inspeccionados.

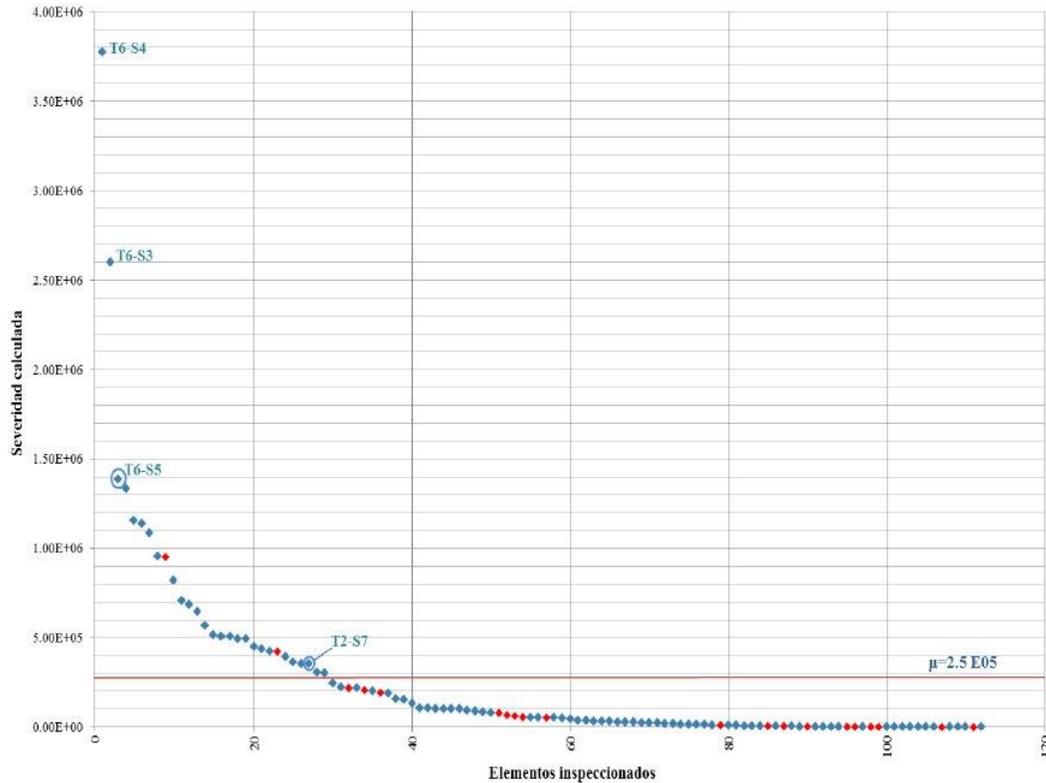


Figura 1.17 Gráfica del índice de severidad, de mayor a menor, para todos los elementos de anclaje

Para establecer una primera correlación entre los defectos de la soldadura y el índice de severidad, e identificar con mayor exactitud cuáles elementos pudieran ser críticos y cuáles no, se seleccionaron dos elementos extremos (T6-S5 y T2-S7) para que fueran descubiertos y se pudieran inspeccionar con líquidos penetrantes y ultrasonido y, siguiendo los criterios del código AWS, calificar la condición de la soldadura.

Al descubrirse los dos elementos de anclaje, se encontró que el T2-S7 (de menor severidad) contenía defectos pequeños que, según el criterio AWS, podían ser aceptables; en tanto que el otro elemento de anclaje (T6-S5) contenía un defecto en la raíz de la soldadura que aplicando el mismo criterio tenía que ser rechazado. En el primer caso, de la soldadura no rechazada, finalmente se cambió el elemento de anclaje por grietas en la superficie que podían ser indicios de esfuerzo bajo corrosión; en un principio se esperaba que la soldadura fuera reparada sin

necesidad de cambiar el elemento de anclaje. En el segundo caso, se determinó que toda soldadura rechazada, implicaba el cambio del elemento de anclaje.

A partir de los resultados anteriores, ahora se grafican todos los elementos de anclaje cuyo índice de severidad es superior al valor promedio (figura 18). Con base en lo descrito anteriormente, se sabe que los elementos con valores de severidad cercanos o superiores al elemento de anclaje T6-S5, muy probablemente contengan defectos en la soldadura y sean rechazados aplicando el criterio del código AWS. Sin embargo, en los que están por debajo de este elemento de anclaje y hasta el T2-S7, puede ser posible que los defectos no lleguen a ser significantes y sean aceptables por el mismo criterio AWS.

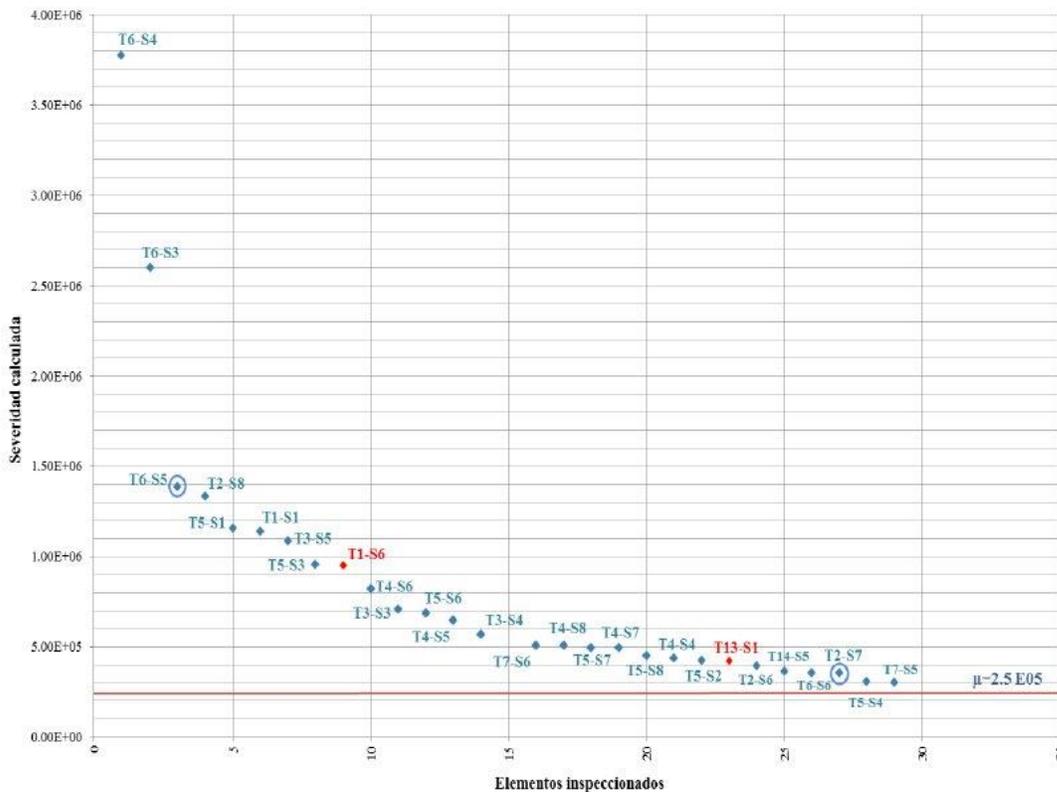


Figura 1.18 Gráfica del índice de severidad de los elementos de anclaje más críticos

Ante esta circunstancia, se ha propuesto continuar con la sustitución de diez elementos de anclaje más, comenzando por el de mayor severidad. El proceso de sustitución sugerido propone abrir la caja para descubrir la soldadura y permitir su inspección por líquidos penetrantes y ultrasonido, para calificar la soldadura de acuerdo con los criterios AWS. Si la soldadura es rechazada, entonces se procede a sustituir el elemento de anclaje; por otro lado, si es aceptable, pero contiene defectos pequeños, se procede a reparar la soldadura para eliminar esos defectos menores sin que sea sustituido el elemento de anclaje. Si al inspeccionar por ultrasonido y líquidos penetrantes el resto del elemento de anclaje y se presentan

defectos, como fue el caso del elemento T2-S7, entonces se considerará su cambio; en caso contrario, se mantiene el criterio de reparar sin sustituir.

El elemento de anclaje T1-S6 está condicionado a una segunda inspección por emisiones acústicas. Si en esta segunda ocasión mantiene el mismo nivel de severidad, entonces se mantiene en la lista de los diez elementos que se proponen cambiar. En caso de que se reduzca el nivel de severidad, entonces se excluye y se considera el siguiente en la secuencia de sustitución, el número 11, el T5-S6.

Derivado de los trabajos de conservación de los elementos de anclaje realizados en el presente año y de los que se realizarán en el año de 2018, surge la necesidad de, por una parte, evaluar la condición estructural del puente Río Papaloapan posterior a la sustitución de los tres elementos de anclaje; y por la otra parte, dar seguimiento a los valores de los parámetros estructurales presentes para realizar la actualización del modelo de elemento finito del puente Río Papaloapan y utilizar la información de este en los trabajos de rehabilitación programados para el año 2018.

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 Prospero del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018.

2 Sistema de Monitoreo puente Río Papaloapan

El sistema de monitoreo instalado en el Puente Río Papaloapan consiste en un sistema de adquisición de datos utilizando tecnología de fibra óptica. La instalación y puesta en marcha del sistema de monitoreo comenzó en diciembre de 2012 y está compuesto por los siguientes sensores y equipos: 24 medidores de deformación, 24 acelerómetros, ocho inclinómetros, un sensor de desplazamiento, 2 cámaras de video, una estación climatológica y una estación sismológica, un interrogador, un multiplexor y un procesador de datos. Los equipos del sistema de adquisición de datos, interrogador, multiplexor y el procesador de datos están dentro de un gabinete con temperatura y humedad controladas. Todos los equipos son energizados a través de 94 celdas fotovoltaicas y 36 baterías de ciclado profundo instaladas en las torres 2 y 3 del puente Río Papaloapan. 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 Río Papaloapan

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
5	Sensores de temperatura	Sensor empleado para medir cambios de temperatura.	Micron Optics	os4350
8	Inclinómetros	Sensor empleado para medir inclinaciones.	FBG TECH	T1-310
24	Acelerómetros	Sensor empleado para medir respuestas dinámicas	Micron Optics	os7100
24	Extensómetros	Sensor empleado para medir deformaciones unitarias en concreto.	Micron Optics	os3600

Los 24 sensores de deformación para concreto fueron instalados sobre la cara inferior de las vigas principales y en la cara interna de las torres 2 y 3 del puente tanto del lado aguas abajo y lado aguas arriba. Cada una de las vigas principales tiene instalados 10 sensores de deformación, distribuidos aproximadamente cada 30 metros en 407 m de la longitud del puente; los últimos cuatro sensores de deformación se instalaron en cada una de las torres que soportan las ocho semi-

arpas del puente, a una altura aproximada de 20 metros. En la figura 2.1 observamos las posiciones de los 24 extensómetros y su identificación en el puente Río Papaloapan.

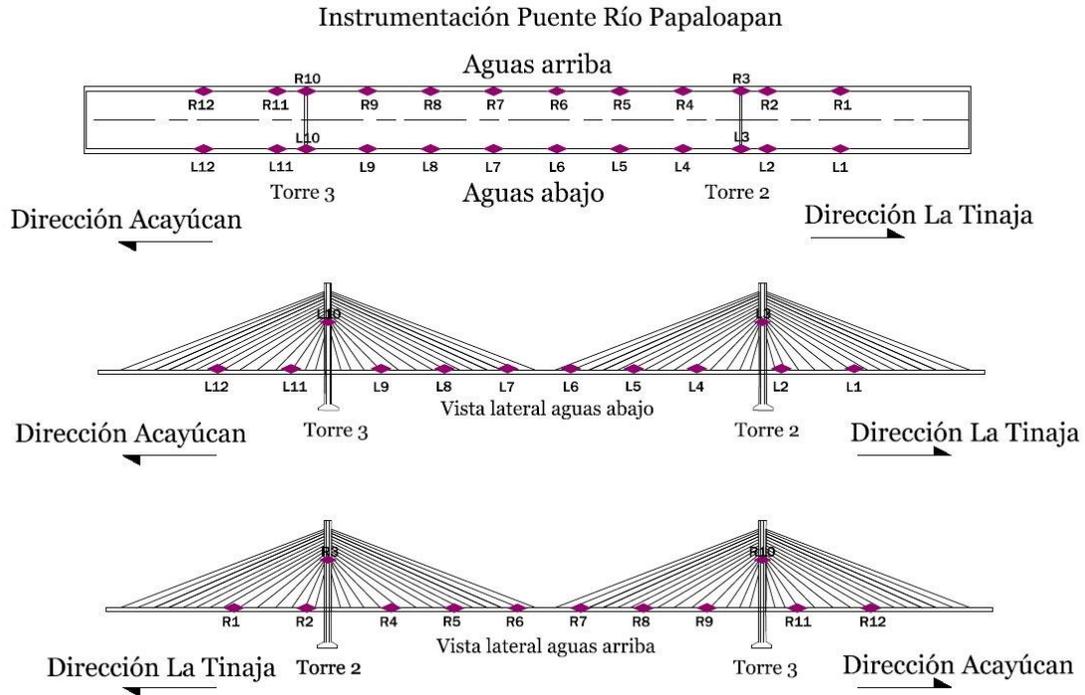


Figura 2.1 Diagrama de instalación de los sensores de deformación de fibra óptica.

De los 24 acelerómetros de fibra óptica, 16 fueron instalados en los tirantes número 4 y número 11 de cada semi-arpa del puente, cada acelerómetro quedó ubicado a la mitad de la longitud total del tirante de sujeción, en tanto que, los ocho acelerómetros restantes fueron colocados en la parte superior de las 2 torres, torre 2 y torre 3, lado aguas arriba y lado aguas abajo; dos para cada posición. Los acelerómetros instalados en las torres son registrar las respuestas dinámicas de aceleración en las direcciones "X" y "Y", dirección longitudinal y transversal respectivamente. La figura 3.2 muestra las ubicaciones de los acelerómetros en el puente.

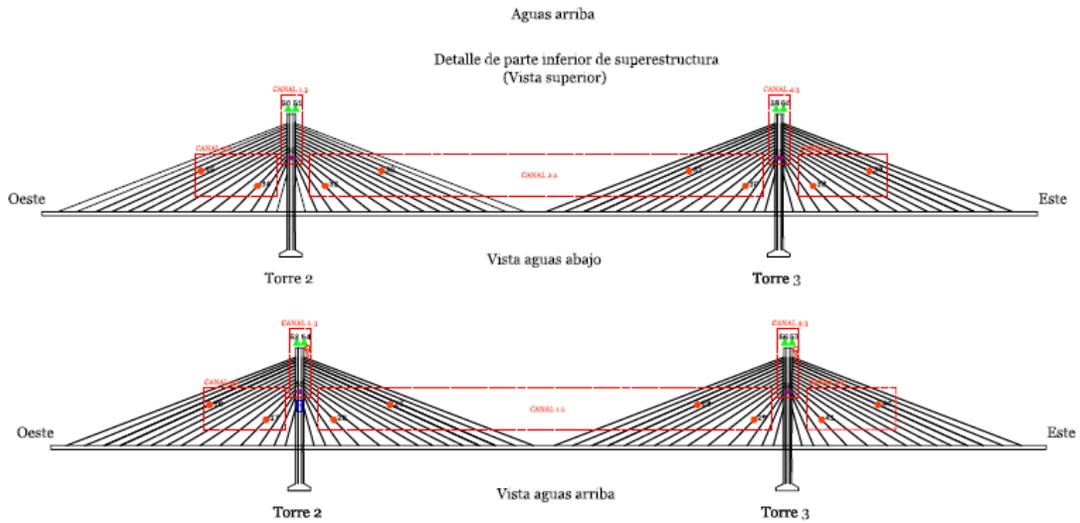


Figura 2.2 Diagrama de instalación de los sensores de deformación de fibra óptica.

Los ocho inclinómetros de fibra óptica fueron colocados en la parte superior de las torres 2 y 3, tanto para el lado aguas arriba como para el lado aguas abajo, dos inclinómetros para cada posición: uno para el plano “XZ” y el otro para el plano “YZ” (figura 2.3).

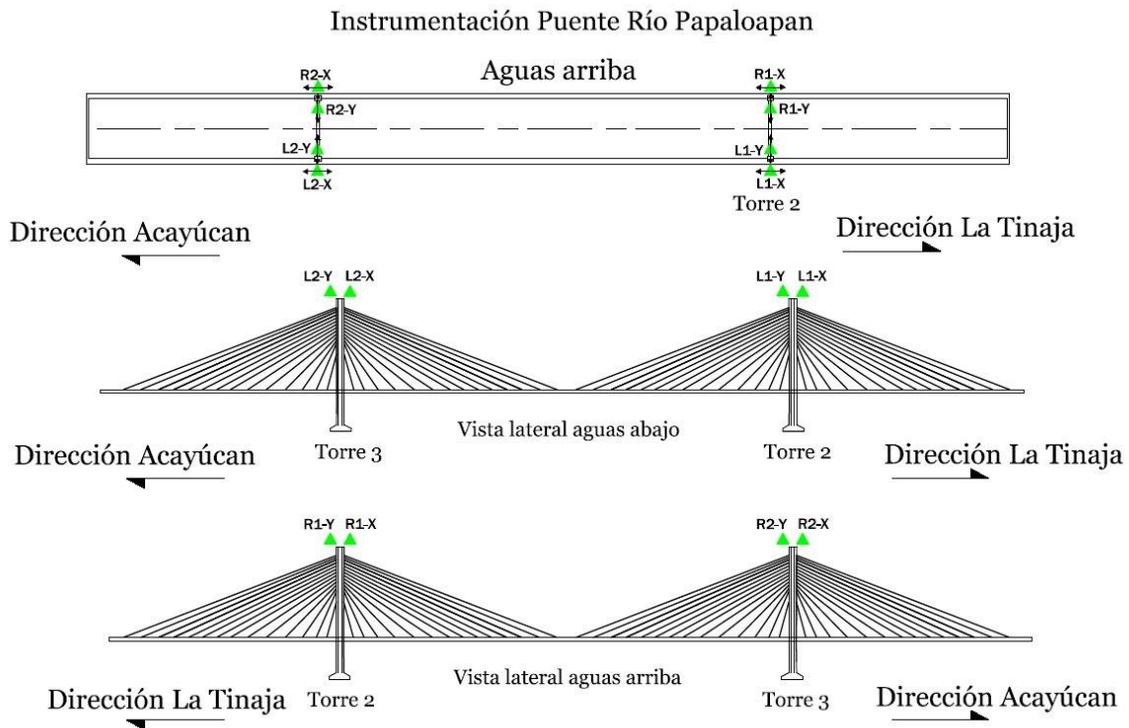


Figura 2.3 Ubicación e identificación de los inclinómetros de fibra óptica.

Finalmente, de los sensores de fibra óptica, se instaló un medidor de desplazamiento en la junta de expansión con dirección a Acayucan. Complementario al sistema de monitoreo de fibra óptica, se incorporó la instalación de dos cámaras de video, marca Bosh, modelo MIC 400, colocadas en las dos torres ubicadas aguas abajo a una altura aproximada de 20 metros, una estación climatológica marca Weather Hawk modelo WXT 520 colocada en la parte superior de la torre 2, ubicada aguas abajo y una estación sismológica Marca Nomis modelo minisupergraph. El interrogador, el Multiplexor y la unidad de control fueron puestos dentro de un gabinete con temperatura y humedad controladas; este a una altura de 12 m en la torre 2, aguas abajo.

3 Seguimiento de los parámetros estructurales del puente Río Papaloapan

A partir del año 2012 hemos dado seguimiento a los parámetros estructurales del puente Río Papaloapan, 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 con el mantenimiento preventivo realizado o algún tipo de daño encontrado. Las variables seguidas en los últimos cinco 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, así como garantizar la seguridad de los usuarios y la integridad del puente.

A continuación, en las figuras 3.1 a 3.24 se puede observar el valor de referencia de deformación desde que fueron instalados los extensómetros de fibra óptica, en el 2012 y hasta el año de 2017. Cada uno de los gráficos tiene líneas que muestran las fechas en las cuáles fue realizado el mantenimiento sobre el puente o se registró un fenómeno natural. Como se puede apreciar, para el caso de mantenimientos realizados, sustitución de elementos de anclaje; la posición del sensor respecto al lugar donde fue realizada la reparación es importante en la sensibilidad del sensor. Si el sensor es relativamente cercano a la posición de un daño o el mantenimiento realizado, es posible evaluar la efectividad de estos trabajos y determinar si los parámetros estructurales del puente regresan a las condiciones normales de operación una vez concluido el mantenimiento.



Figura 3.1 Valores de deformación unitaria para el sensor R1

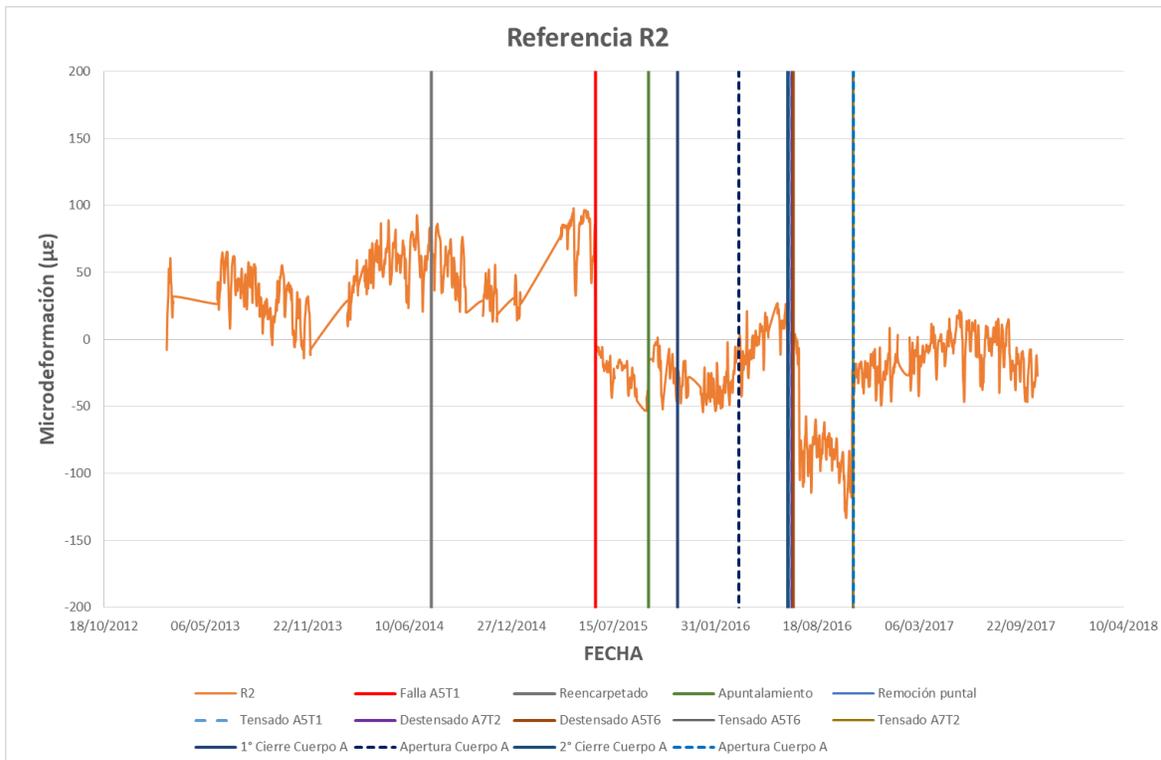


Figura 3.2 Valores de deformación unitaria para el sensor R2

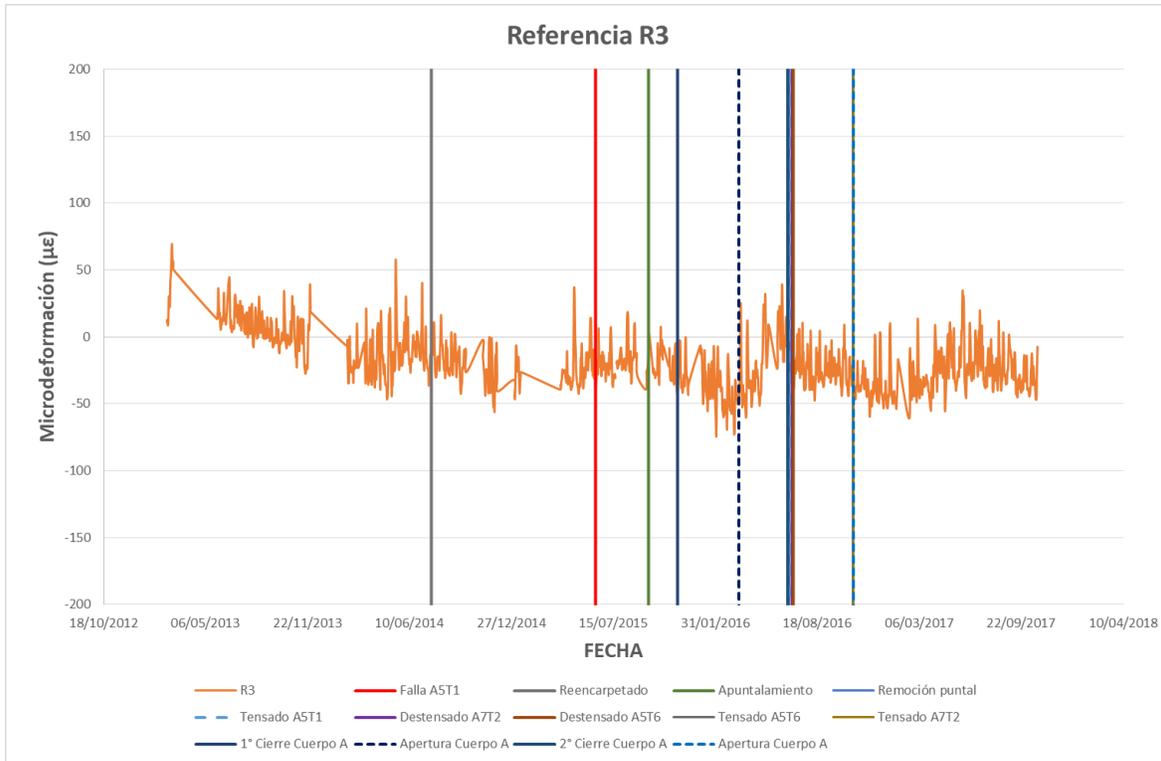


Figura 3.3 Valores de deformación unitaria para el sensor R3

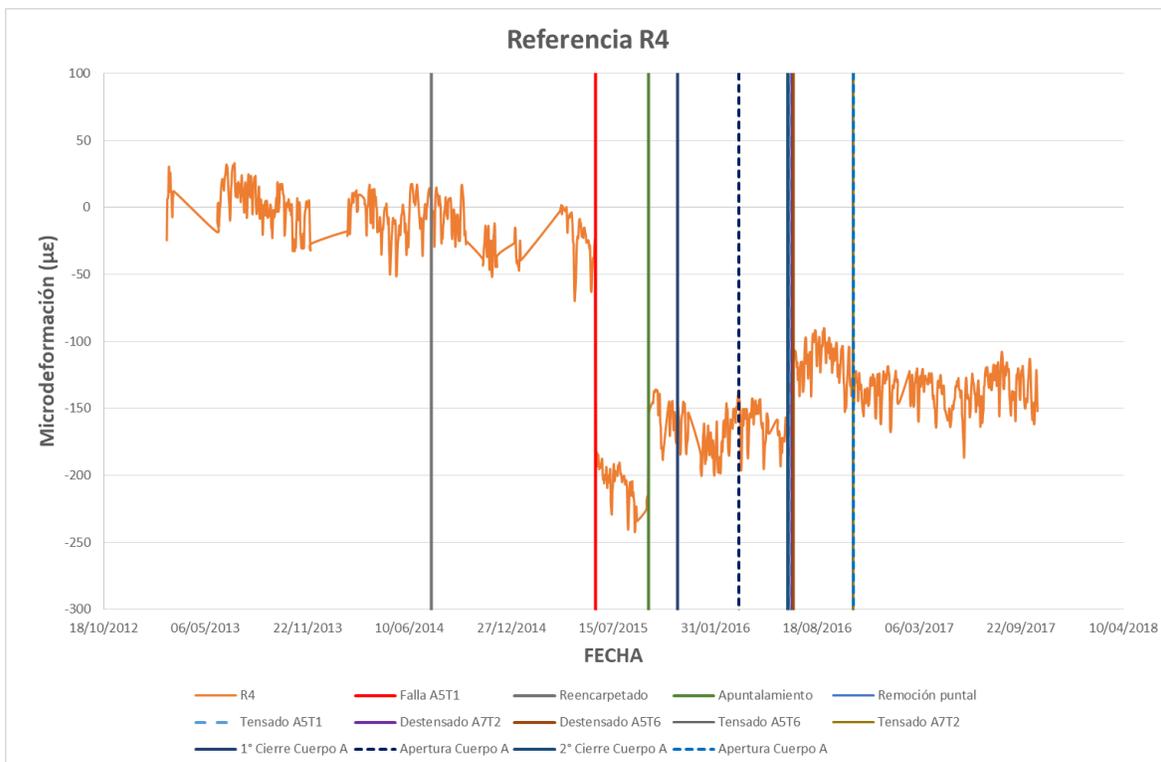


Figura 3.4 Valores de deformación unitaria para el sensor R4

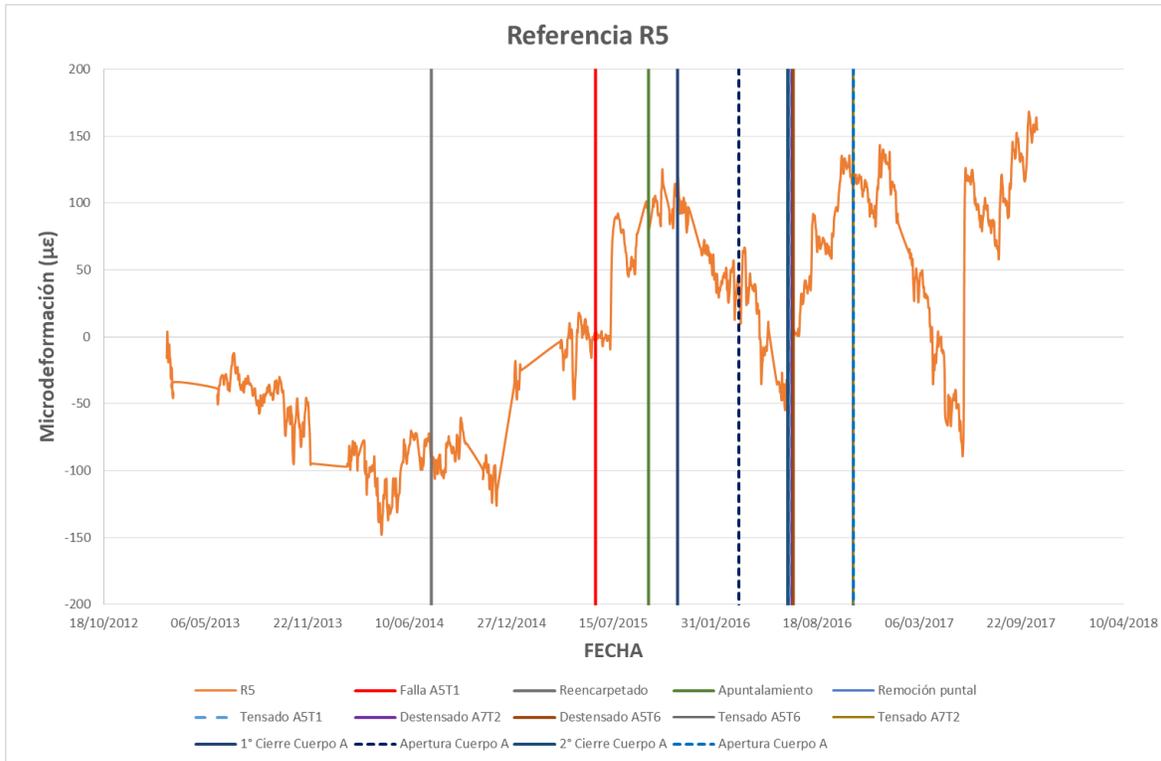


Figura 3.5 Valores de deformación unitaria para el sensor R5

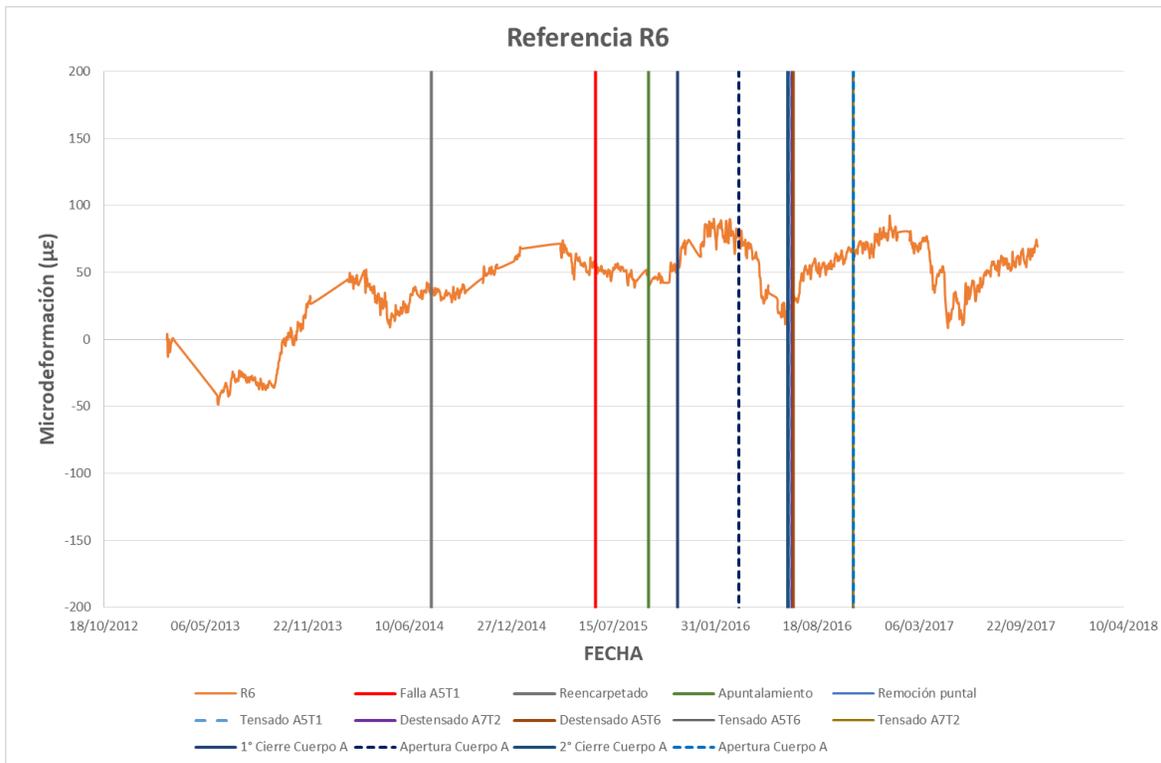


Figura 3.6 Valores de deformación unitaria para el sensor R6

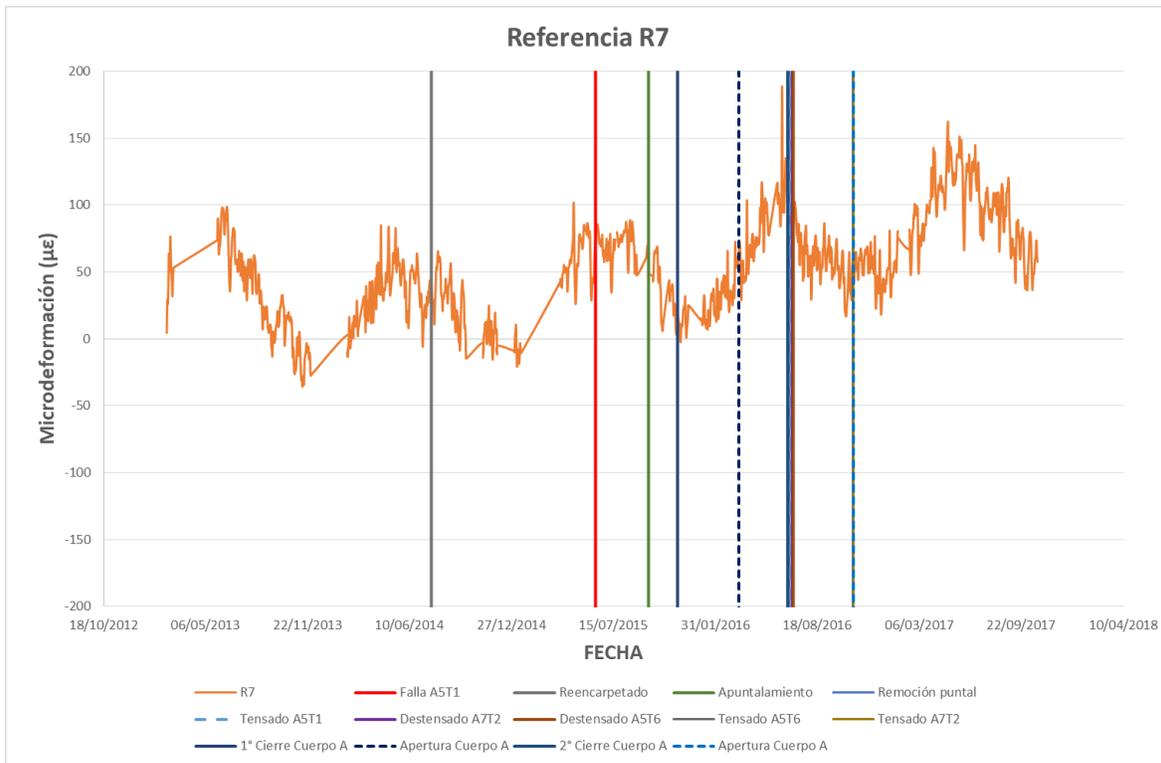


Figura 3.7 Valores de deformación unitaria para el sensor R7

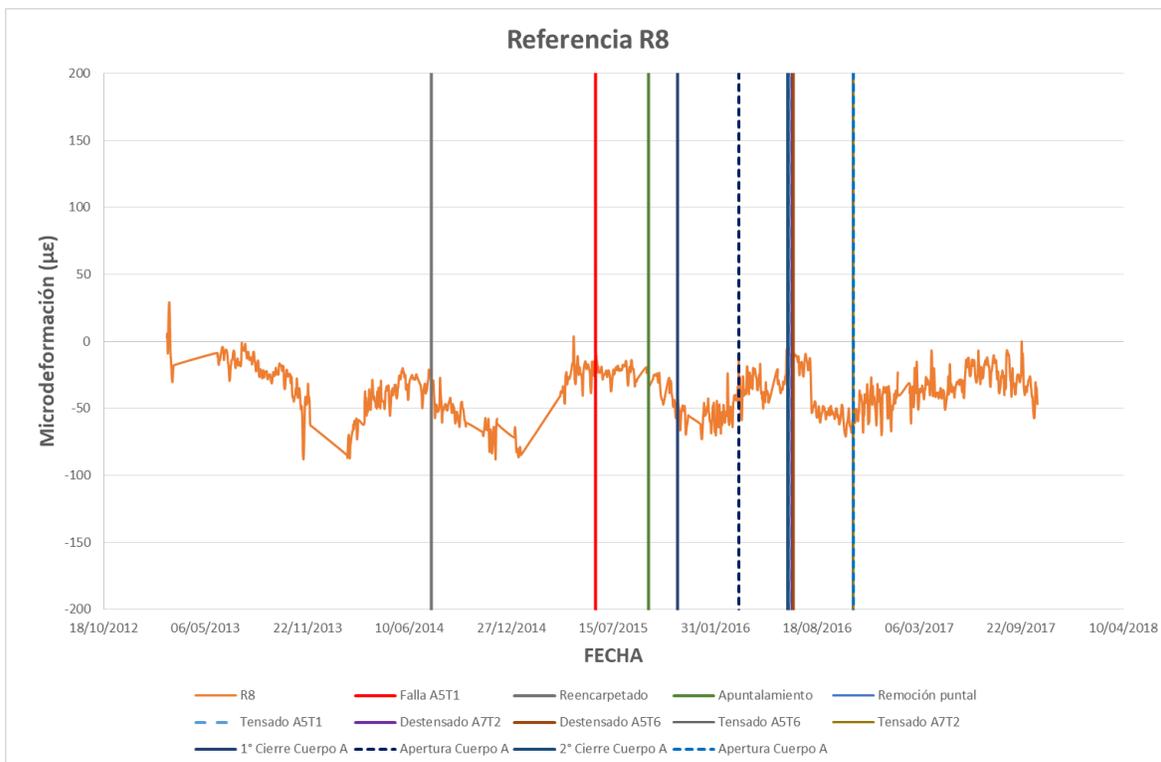


Figura 3.8 Valores de deformación unitaria para el sensor R8



Figura 3.9 Valores de deformación unitaria para el sensor R9

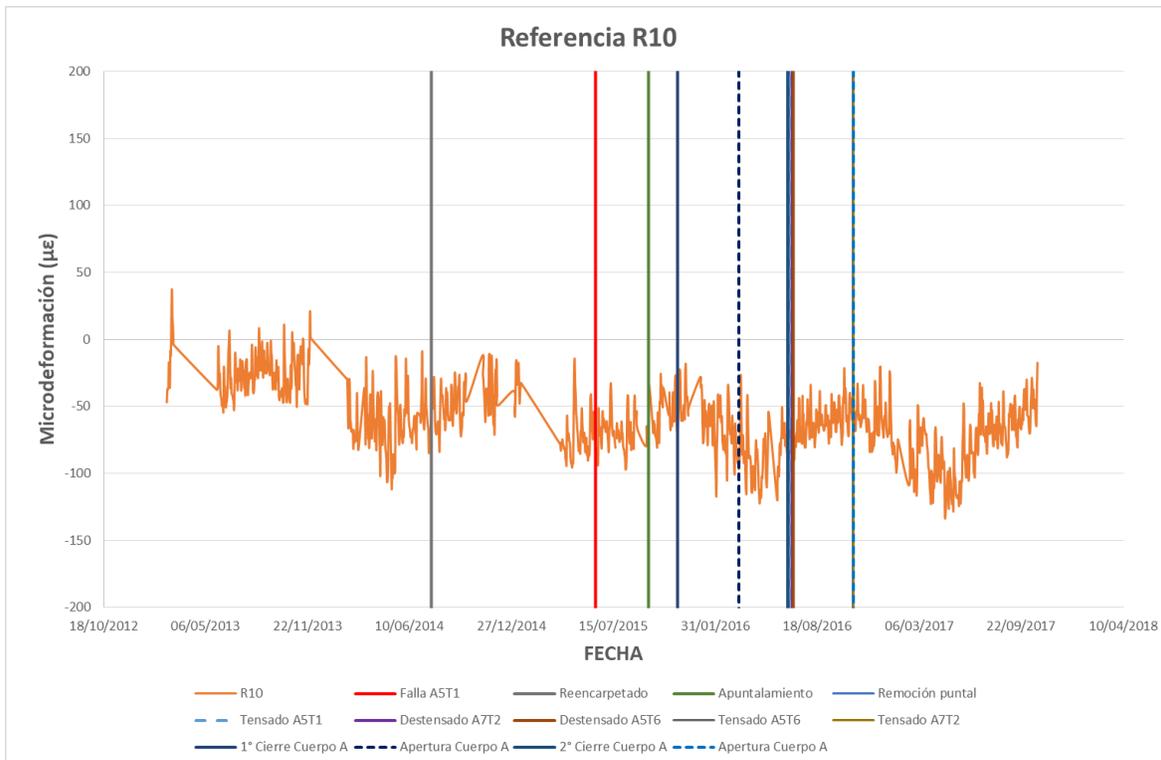


Figura 3.10 Valores de deformación unitaria para el sensor R10

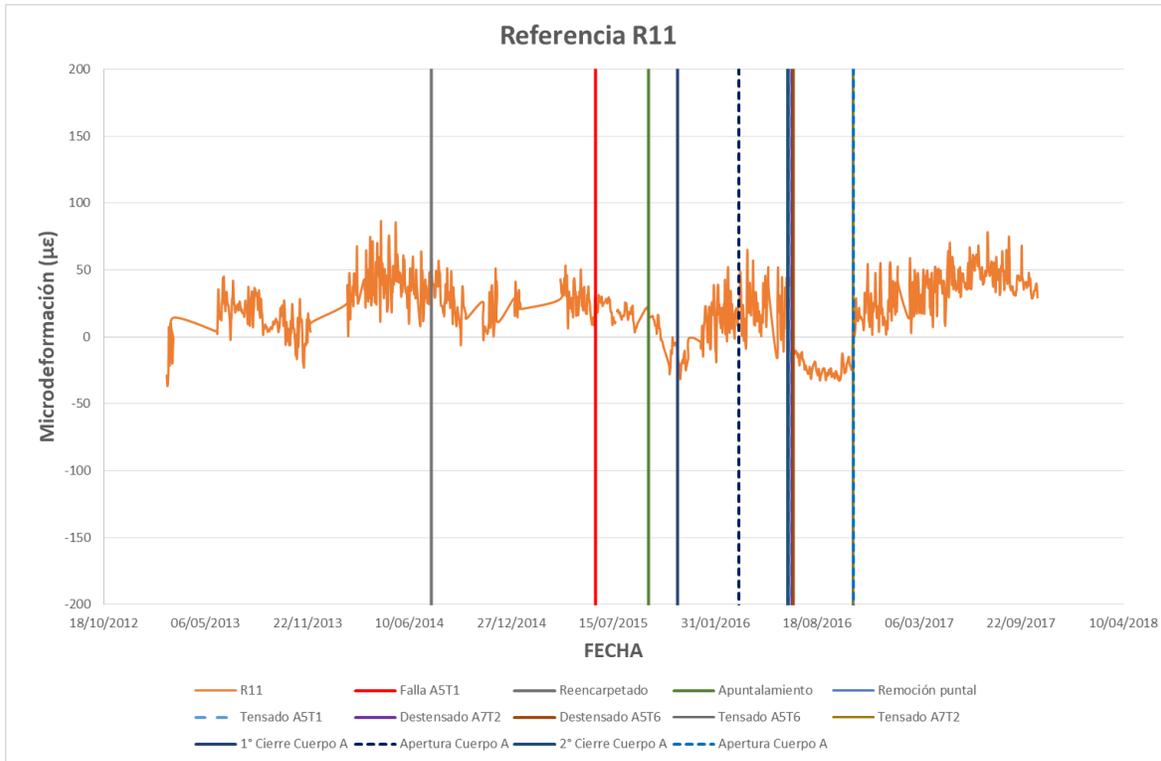


Figura 3.11 Valores de deformación unitaria para el sensor R11

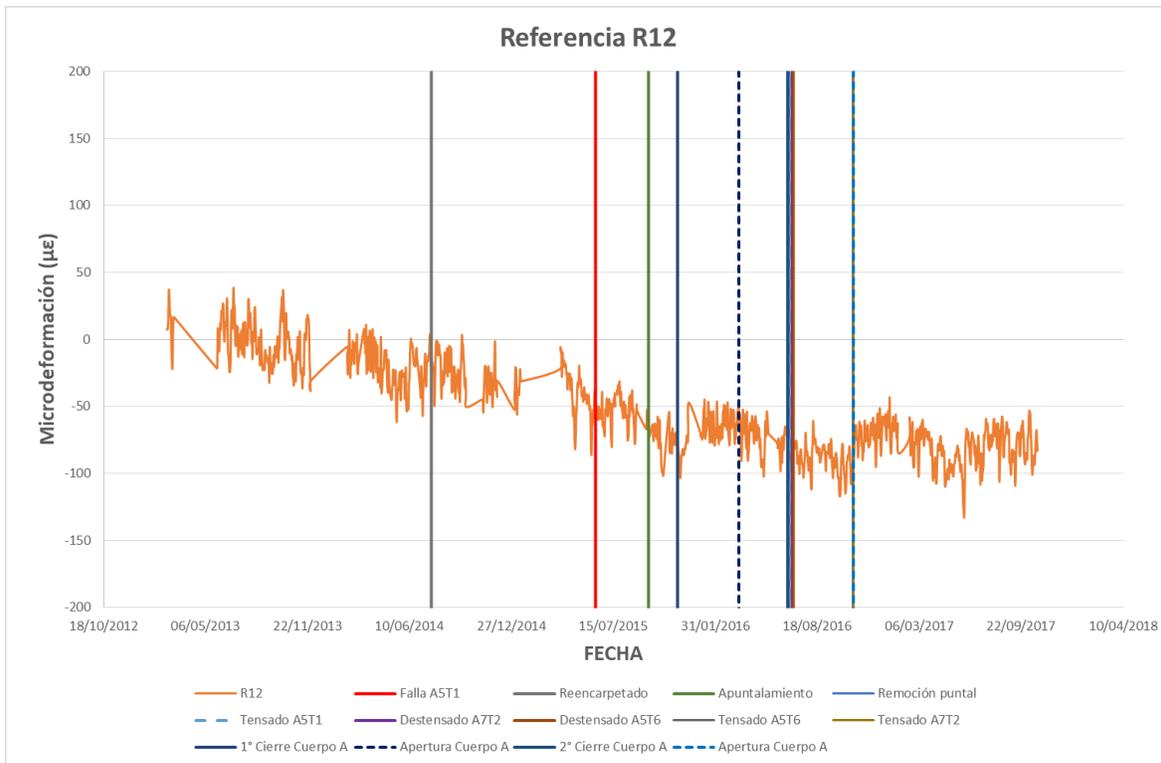


Figura 3.12 Valores de deformación unitaria para el sensor R12

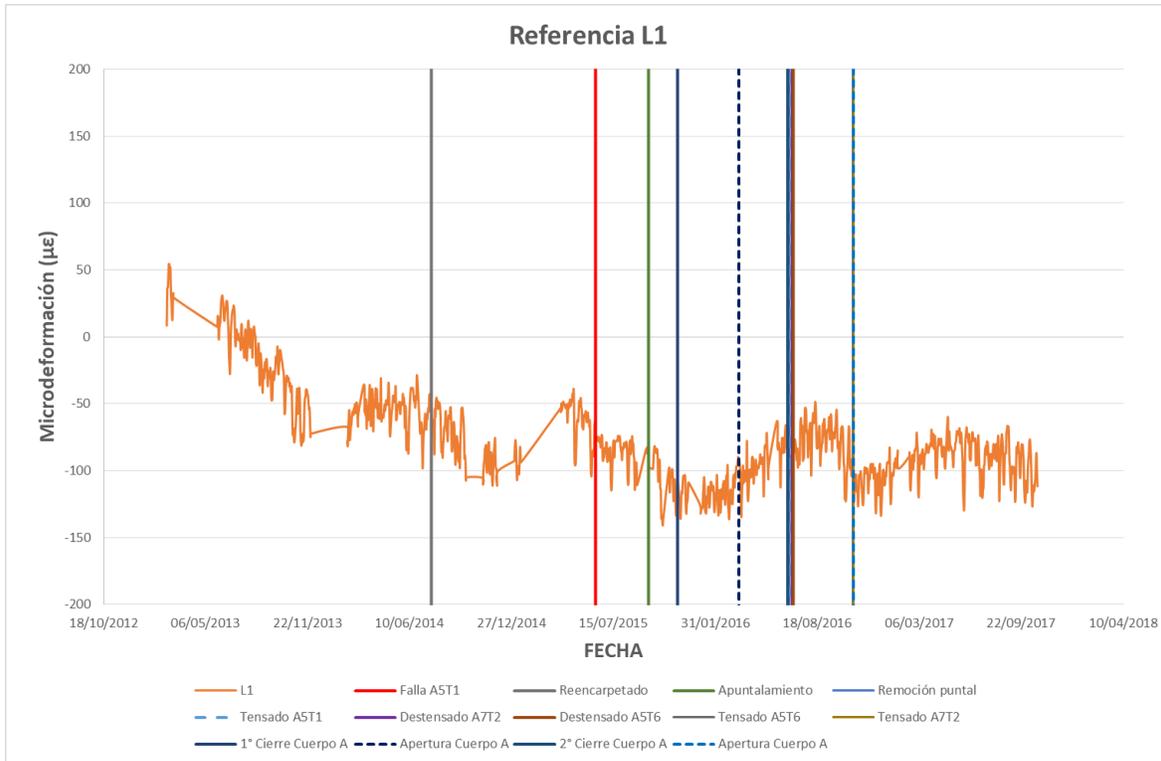


Figura 3.13 Valores de deformación unitaria para el sensor L1



Figura 3.14 Valores de deformación unitaria para el sensor L2

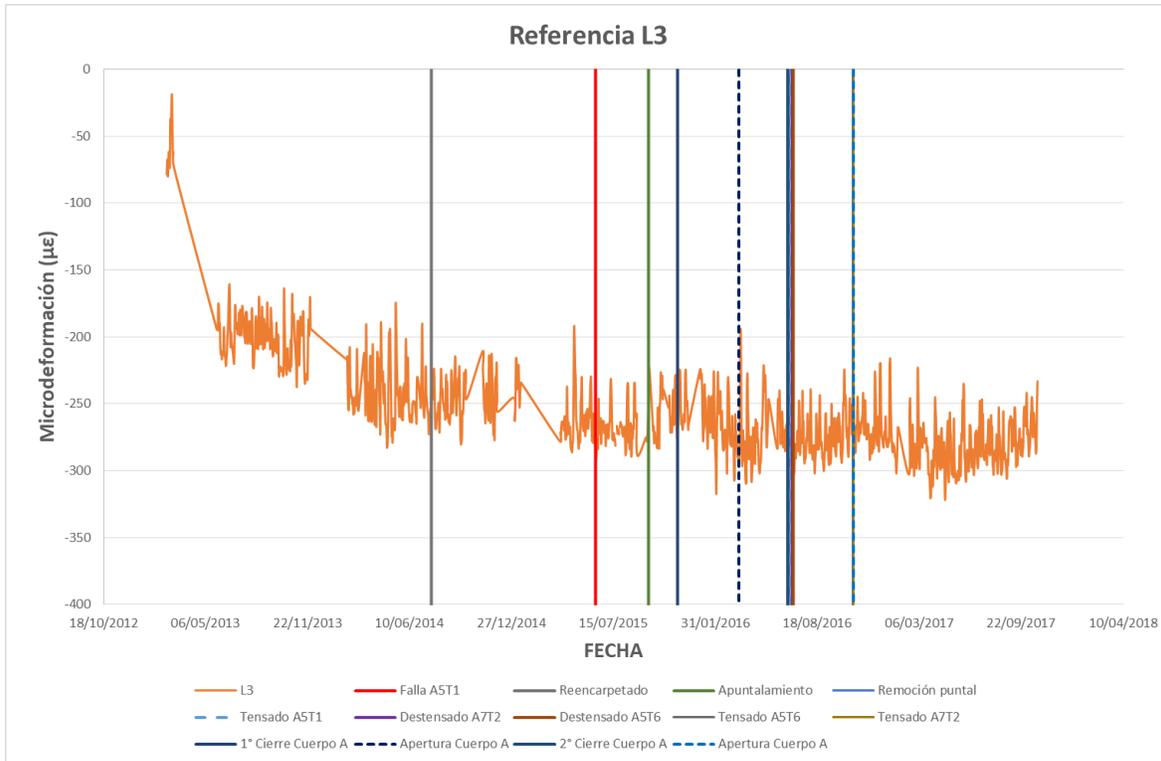


Figura 3.15 Valores de deformación unitaria para el sensor L3

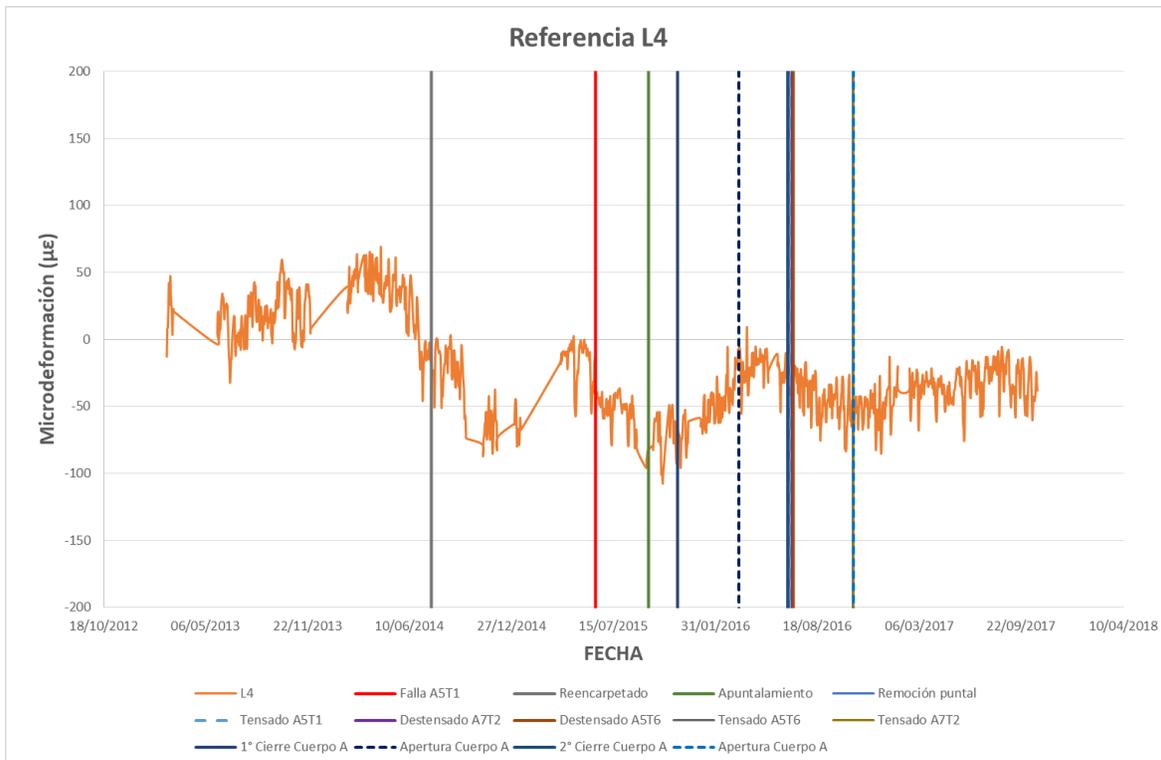


Figura 3.16 Valores de deformación unitaria para el sensor L4

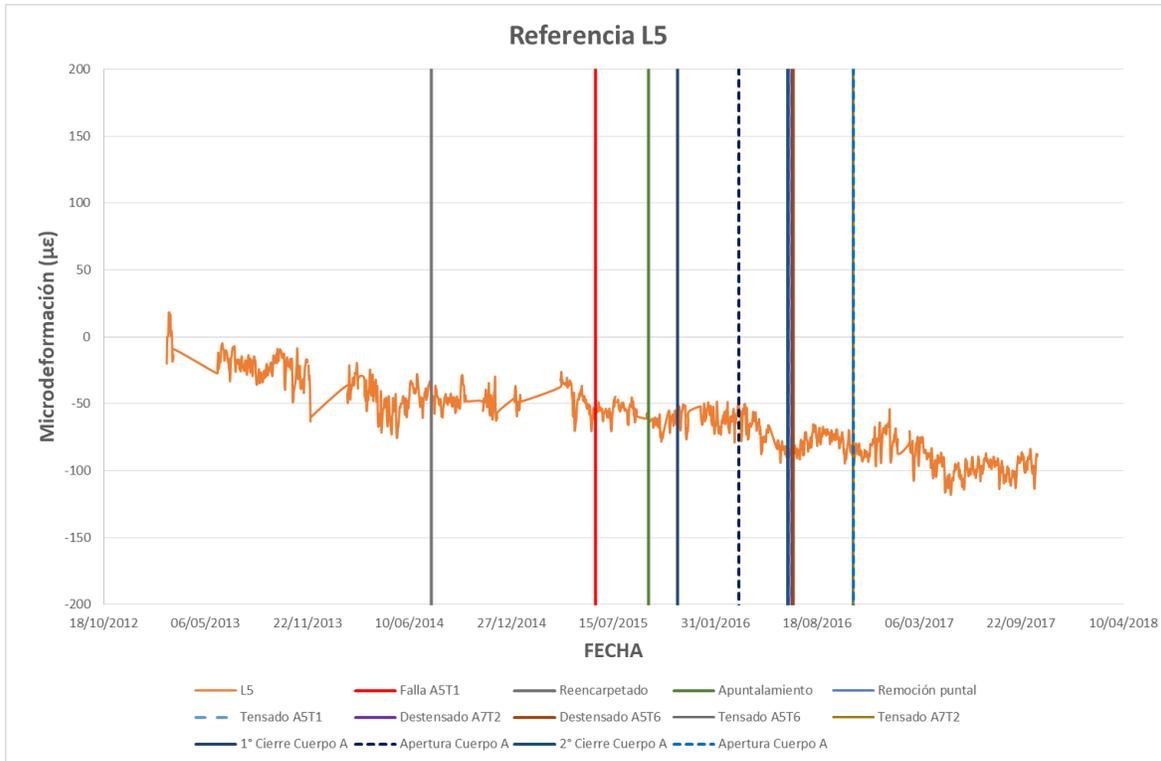


Figura 3.17 Valores de deformación unitaria para el sensor L5

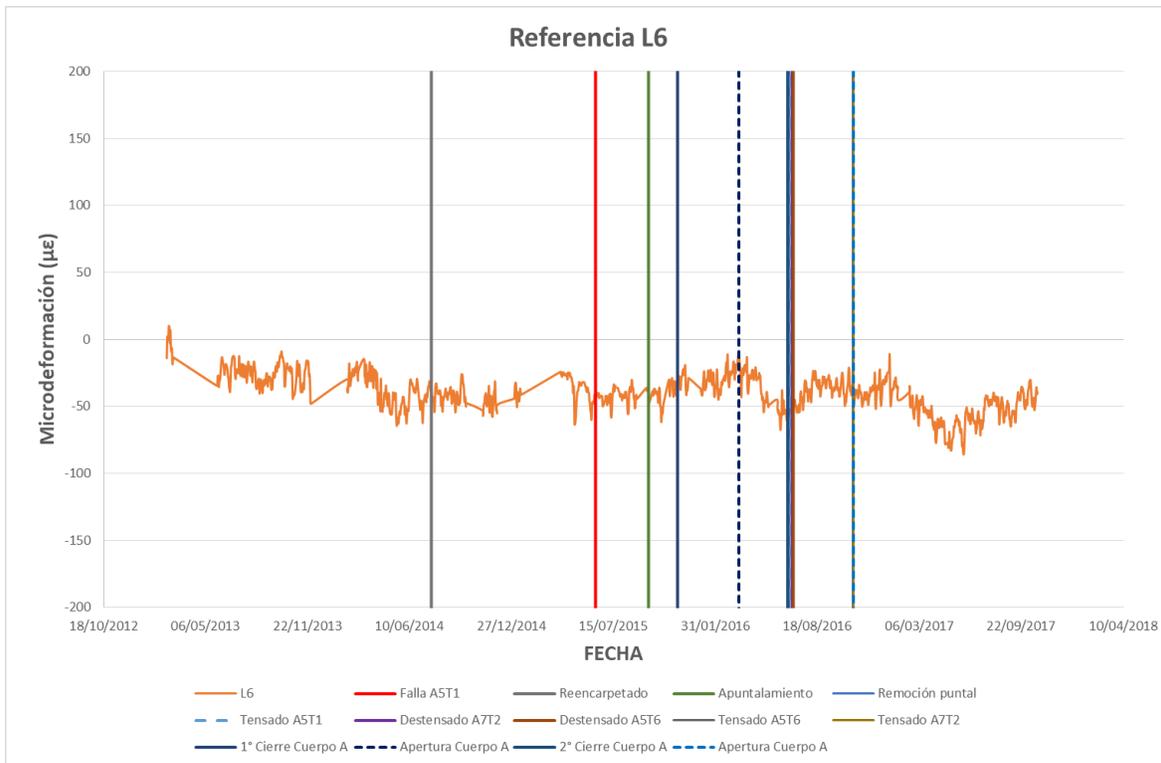


Figura 3.18 Valores de deformación unitaria para el sensor L6

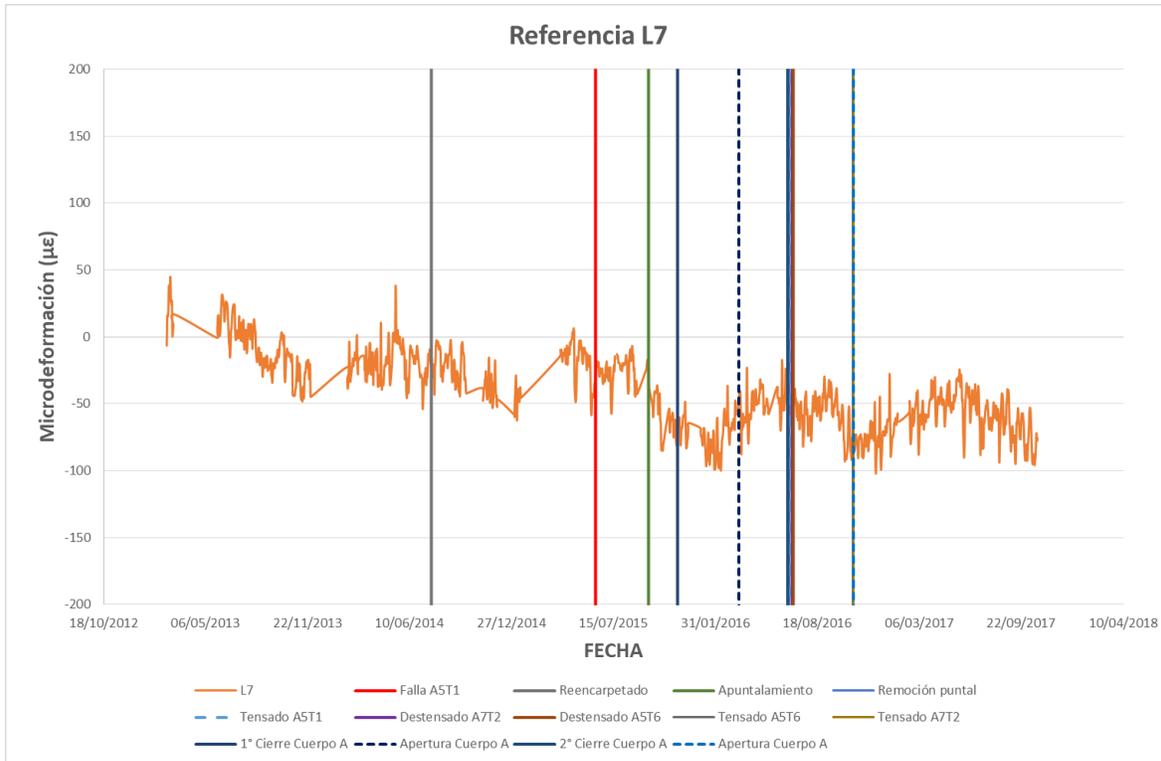


Figura 3.19 Valores de deformación unitaria para el sensor L7

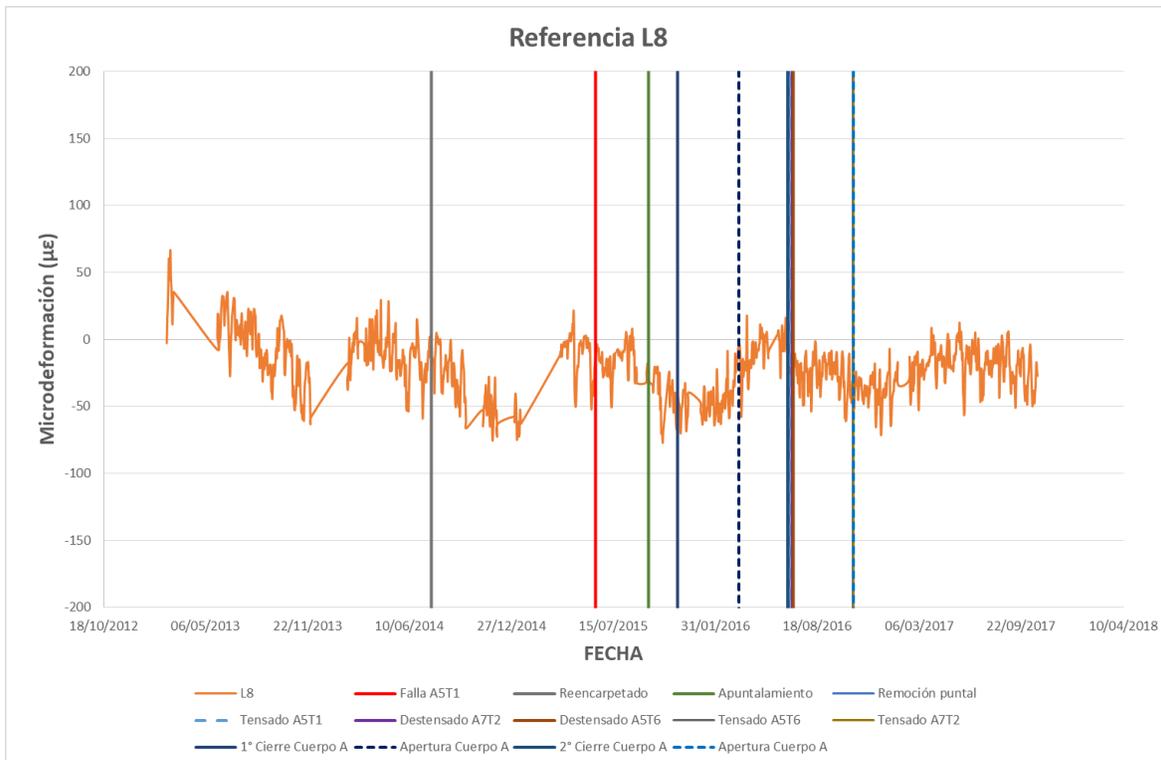


Figura 3.20 Valores de deformación unitaria para el sensor L8

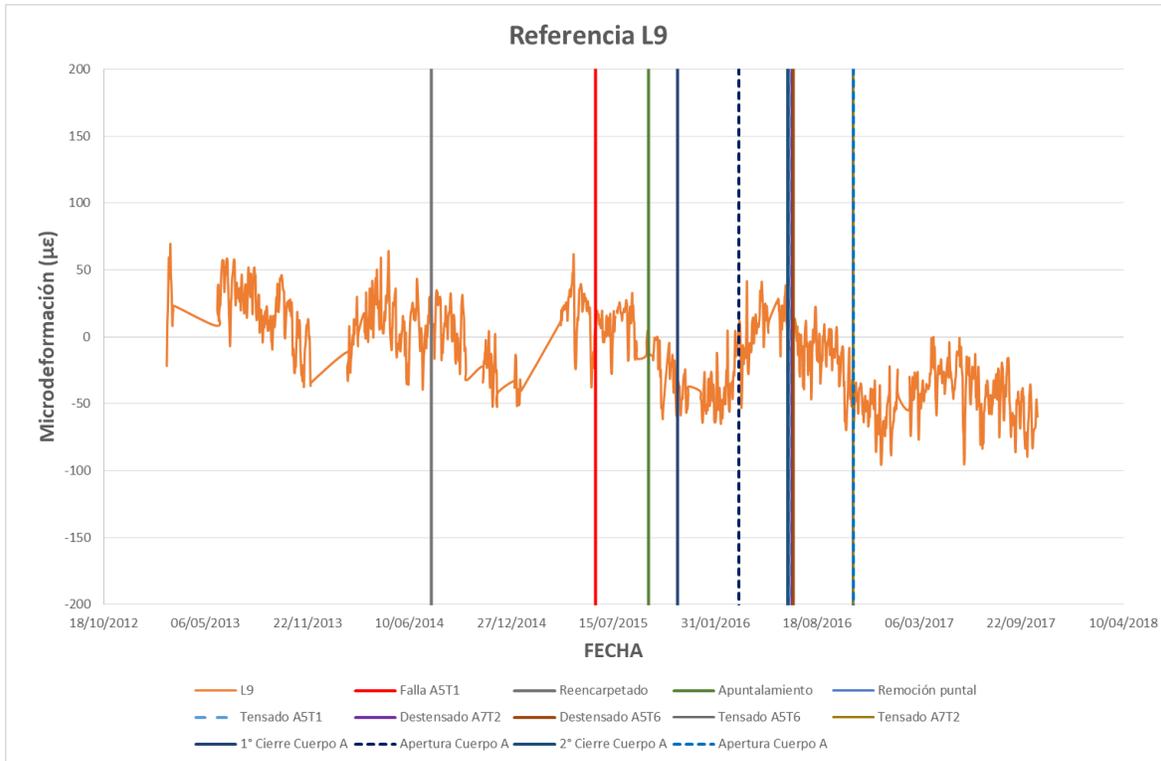


Figura 3.21 Valores de deformación unitaria para el sensor L9

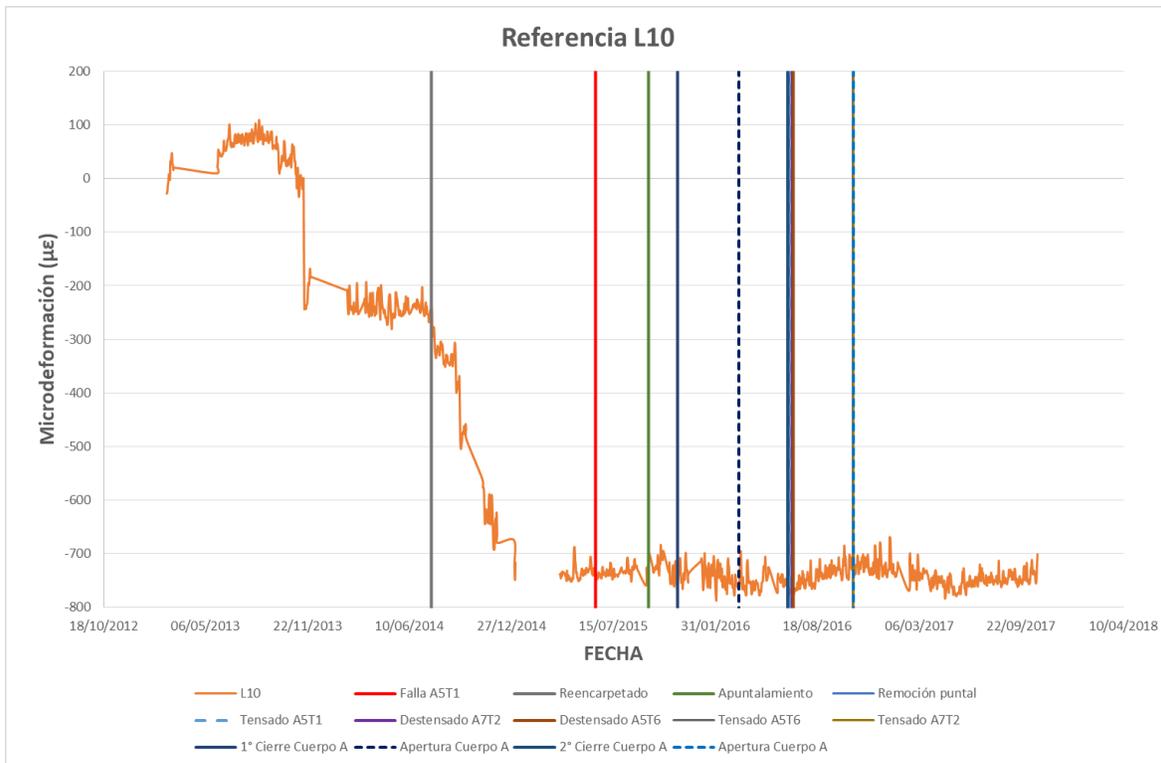


Figura 3.22 Valores de deformación unitaria para el sensor L10

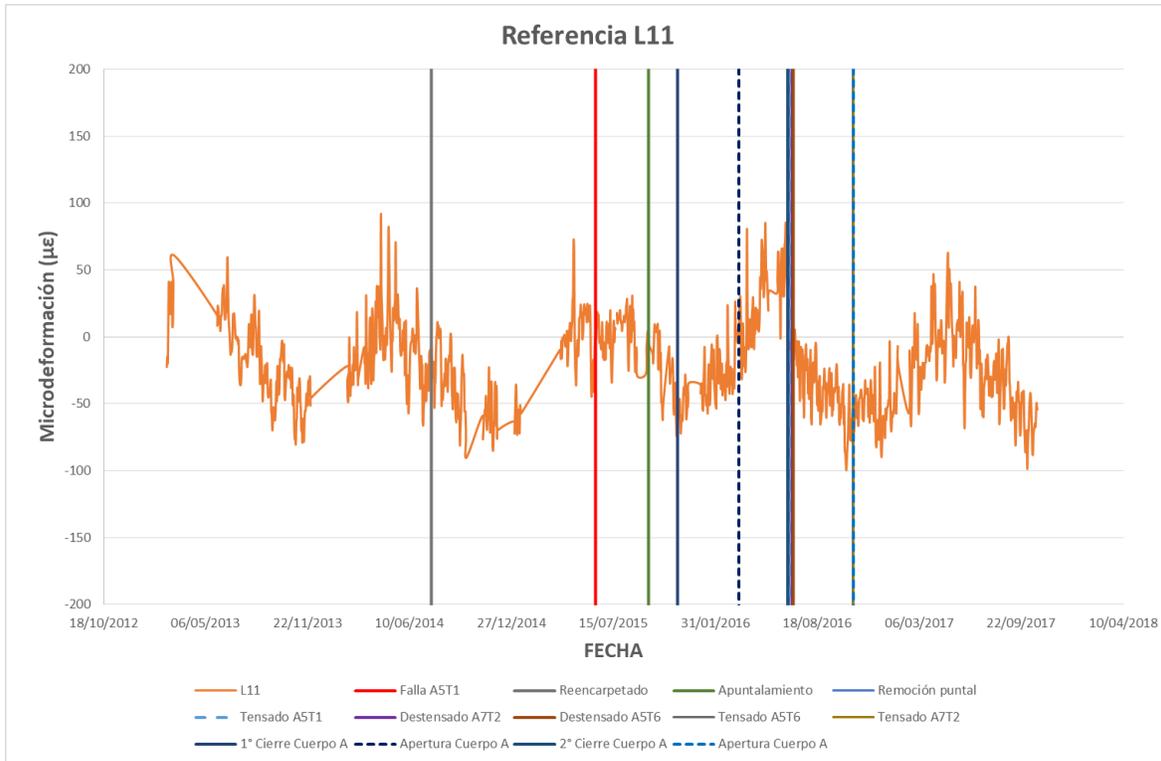


Figura 3.23 Valores de deformación unitaria para el sensor L11

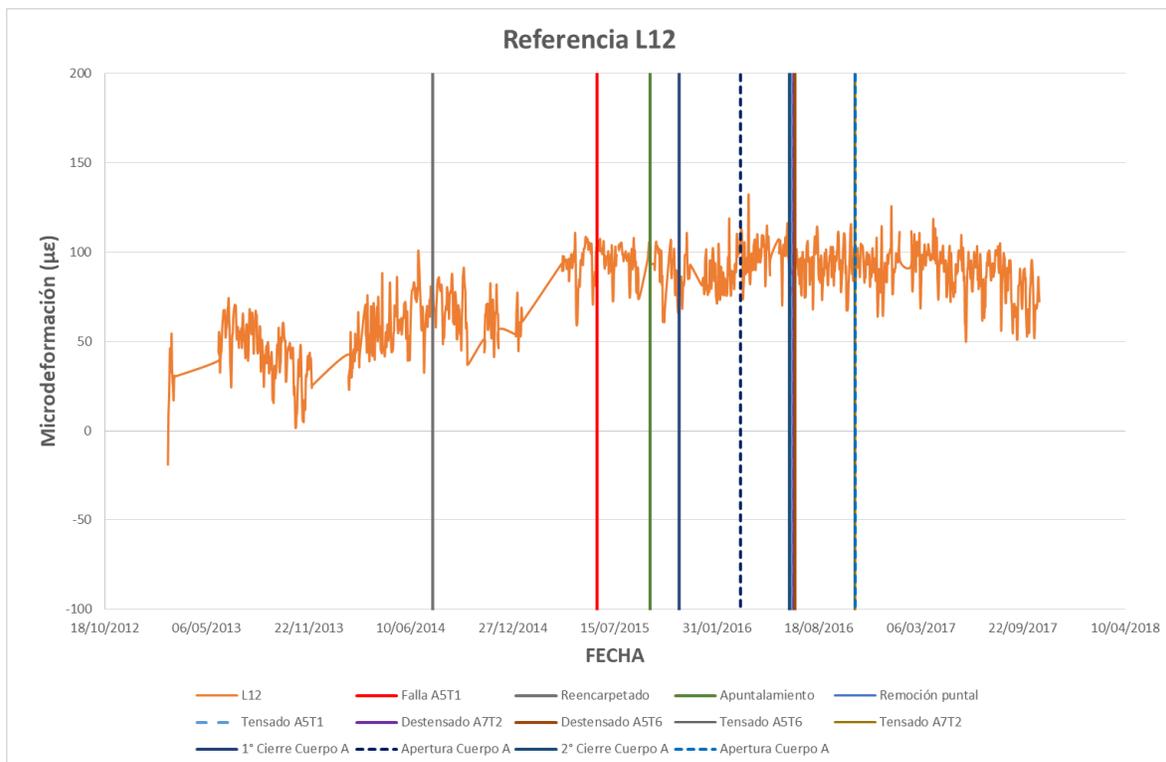


Figura 3.24 Valores de deformación unitaria para el sensor L12

Como se puede observar en las figuras de la 3.1 a la 3.24, los sensores R2, R4 y R5 que están ubicados en la semi-arpa 5 y la semi-arpa 6 no regresaron a su valor de referencia después del mantenimiento realizado para reparar el tirante 1 de la semi-arpa 5. Lo anterior se debe en parte a que la tensión final del tirante 1 de la semi-arpa 5 quedó 20 toneladas por debajo de su valor antes de la falla. La diferencia en la medición de la tensión de este cable es consecuencia de la metodología empleada para determinar la tensión a través de sistemas hidráulicos; la cual debe ser revisada para que los valores de incertidumbre de la medición sean menores. El valor de una tensión menor en el tirante 1 de la semi-arpa 5 fue analizado no solo por los valores de deformación finales de los extensómetros mencionados; sino también, como se analizará más adelante, por la redistribución de tensiones en los tirantes aledaños.

En las mismas figuras se puede ver un cambio menor en el sensor L2, y existe una línea de tendencia en los valores de los sensores L5, L7 y L9; la cual debe ser seguida con detenimiento. En el caso del sensor L10, el cambio que se observa es debido a un mal funcionamiento que originó el corrimiento del sensor en los puntos de sujeción.

Las figuras 3.25 a 3.31 muestran la información de seis inclinómetros instalados en el puente Río Papaloapan. Los inclinómetros instalados en la torre 2, tanto lado aguas arriba como lado aguas abajo, ubicados para registrar la inclinación del plano XZ, requieren de mantenimiento debido a que se presenta una ruptura en el cable de fibra óptica y no es posible registrar la información.

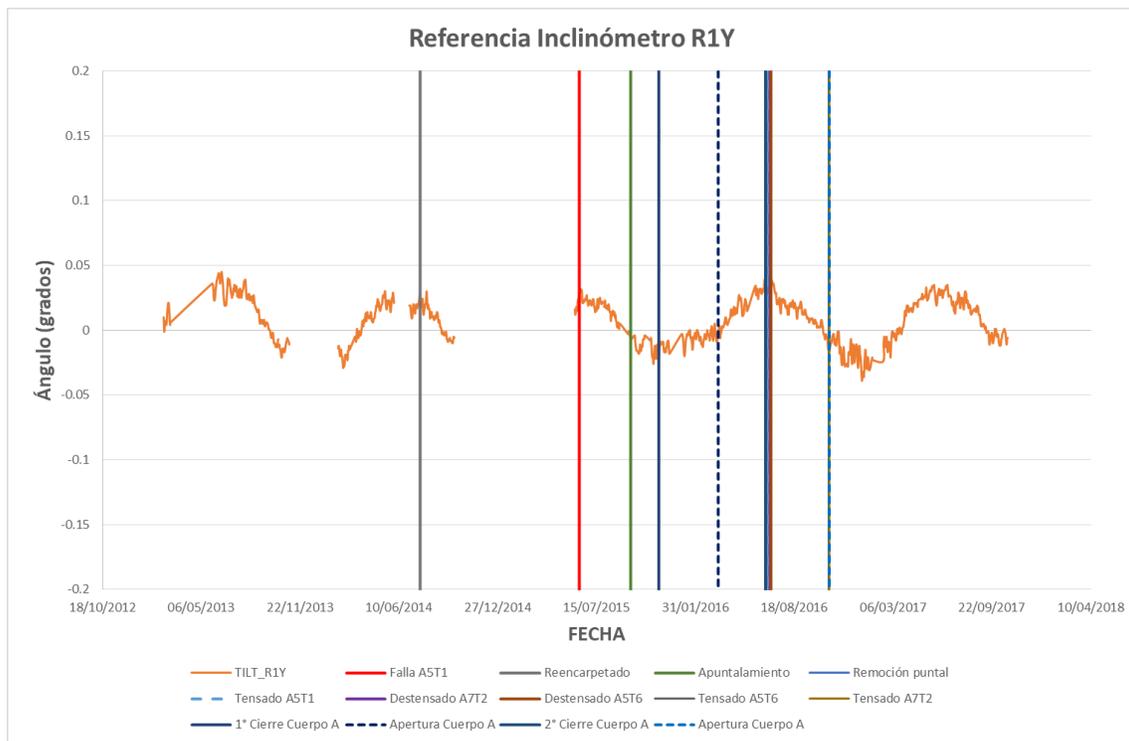


Figura 3.25 Valores de inclinación en el plano YZ del sensor R1Y

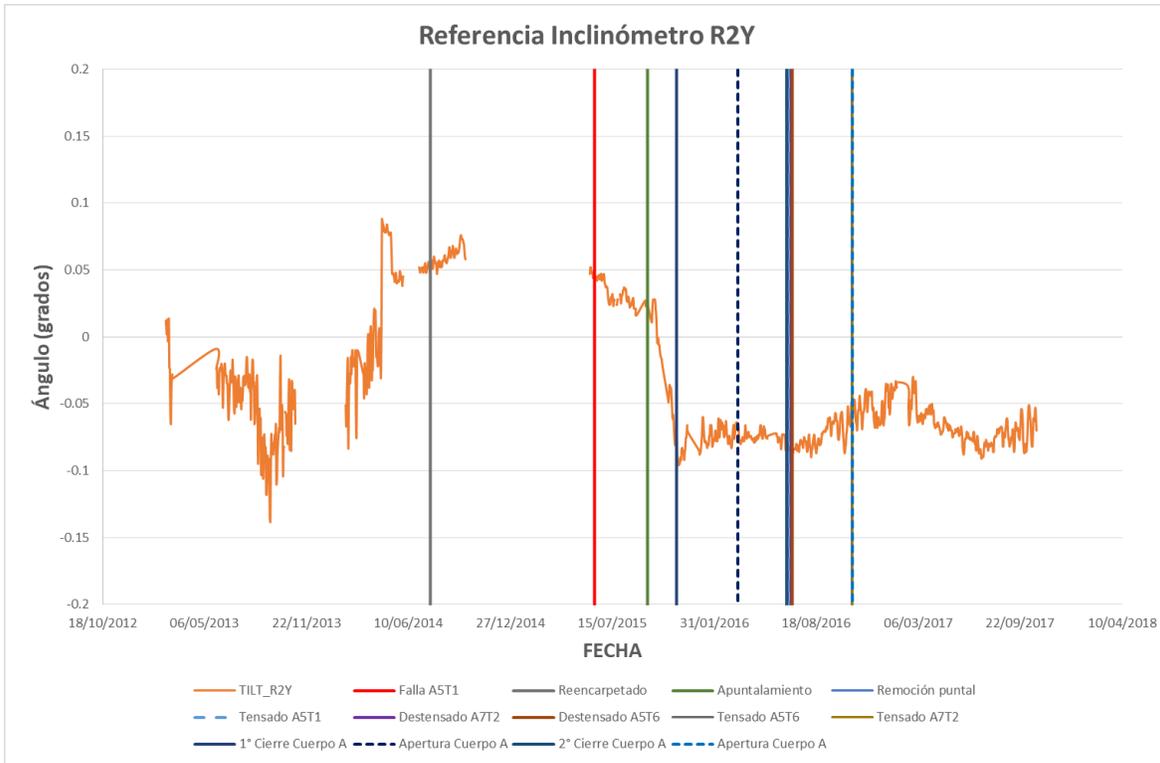


Figura 3.26 Valores de inclinación en el plano YZ del sensor R2Y

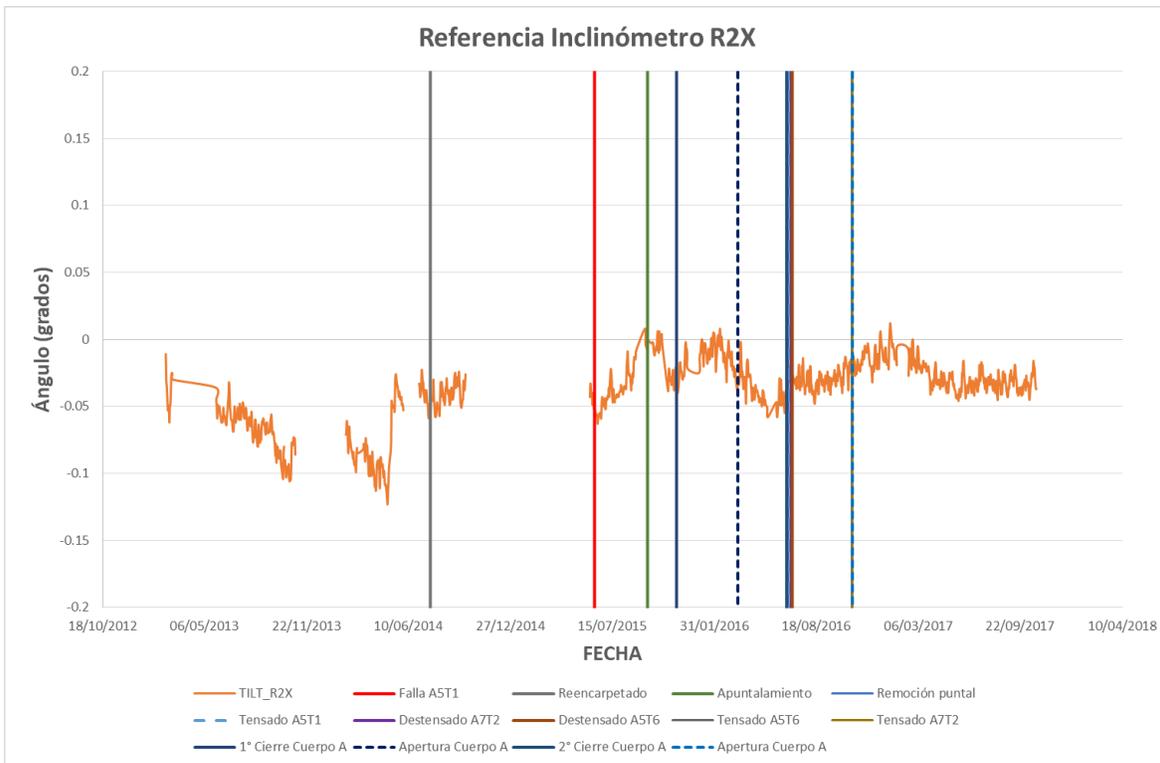


Figura 3.27 Valores de inclinación en el plano XZ del sensor R2X

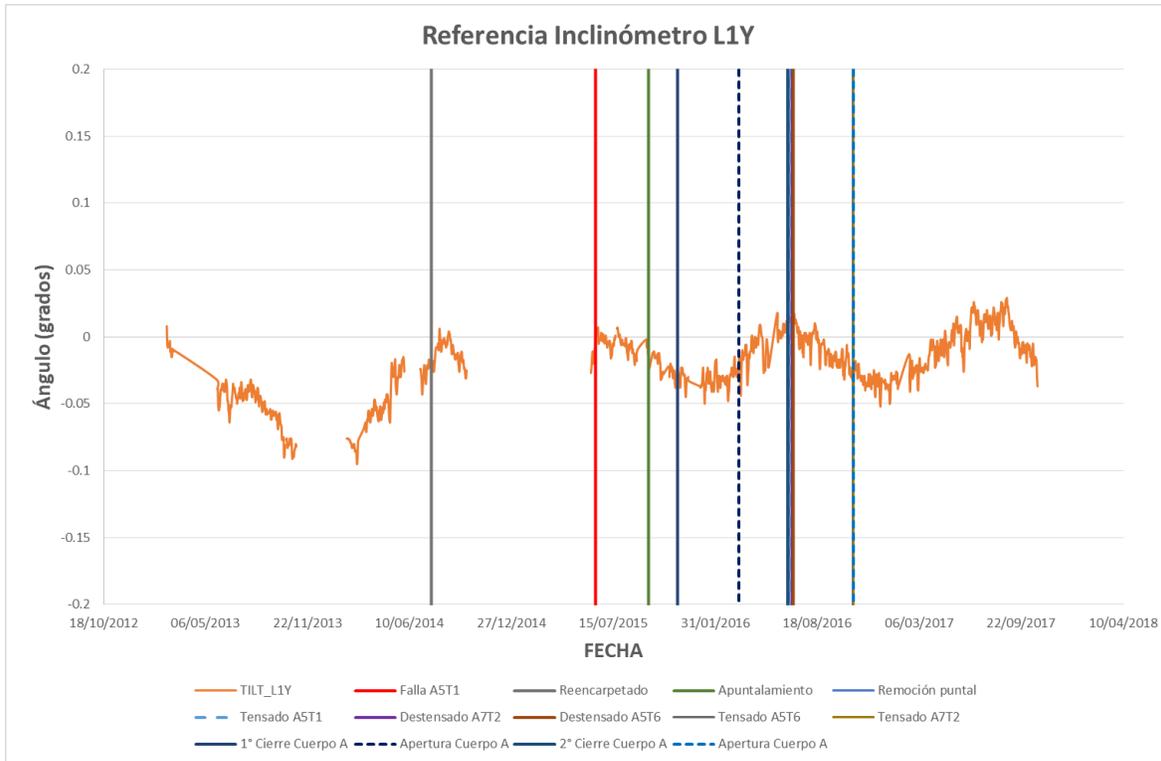


Figura 3.28 Valores de inclinación en el plano YZ del sensor L1Y

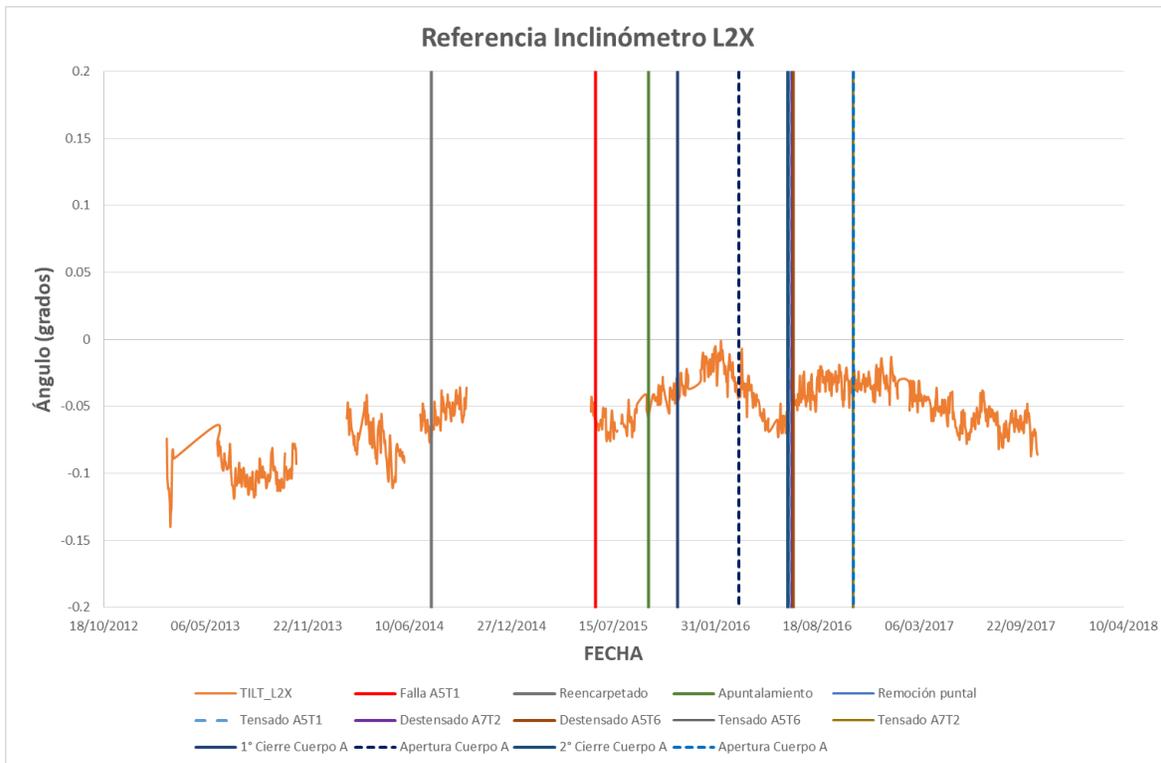


Figura 3.29 Valores de inclinación en el plano XZ del sensor L2X

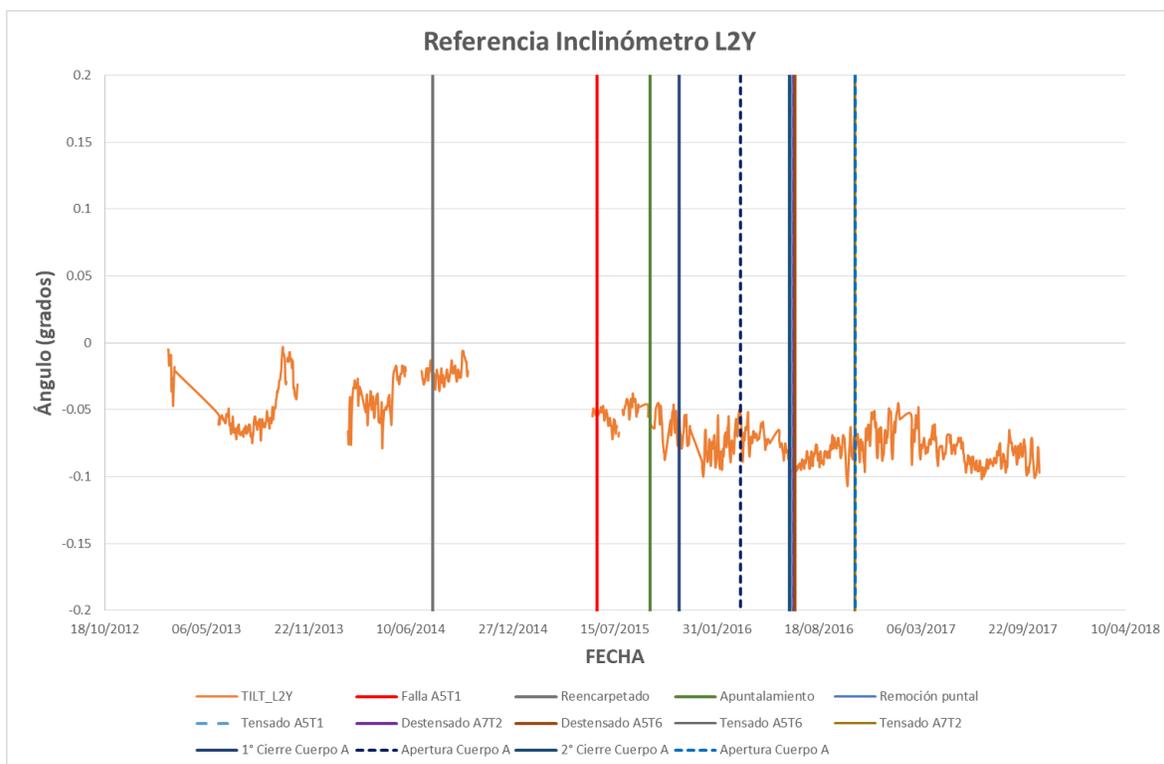


Figura 3.30 Valores de inclinación en el plano YZ del sensor L2Y

La instalación del sistema de monitoreo incluye 16 acelerómetros, 8 de ellos colocados en los tirantes 4 y 11 de las 8 semi-arpas (ver figura 2.2); de la información obtenida de estos 8 sensores, se ha realizado el monitoreo de las tensiones de los tirantes instrumentados en forma continua y se han detectado dos eventos importantes: el primero, en junio de 2014, cuando se hizo el mantenimiento de la carpeta asfáltica del puente, que provocó un incremento de tensión de los tirantes en aproximadamente 1.5 toneladas; y el segundo, la falla del tirante 1, semi-arpa 5, el 10 de junio de 2015.

En las figuras 2.31 a 2.36, se muestran las gráficas de los valores de la media estadística de las tensiones calculadas en periodos de 15 días, con mediciones de 3 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.

Como observamos en los gráficos, las tensiones bajo condiciones de operación normal, después de la falla del tirante 1 de la semi-arpa 5, solo se modificaron en los tirantes 4 de las semi-arpas 4, 5 y 6. En el caso de los dos primeros, semi-arpa 4 y 5, su carga axial incrementó en promedio 2 y 14 toneladas respectivamente; y el tirante 4 de la semi-arpa 6 registró una pérdida de carga axial de 6 toneladas.

Posteriormente a la rehabilitación del Puente Río Papaloapan que consistió en el cambio de los elementos de anclaje 1 de la semi-arpa 5, 6 de la semi-arpa 5 y 2 de

La semi-arpa 7 observamos cambios en la tensión de los tirantes instrumentados con respecto a su condición antes del daño menores a 4 toneladas; con excepción del tirante 4 de la semi-arpa 7, que registró un cambio de 8 toneladas, debido a la cercanía del tirante 2 de la semi-arpa 7, el cual fue sustituido.

Algunos sensores de aceleración dejaron de adquirir datos debido a que durante los trabajos de rehabilitación los cables de fibra óptica fueron dañados; lo que urgía a darle mantenimiento para recuperar la información de estos sensores.

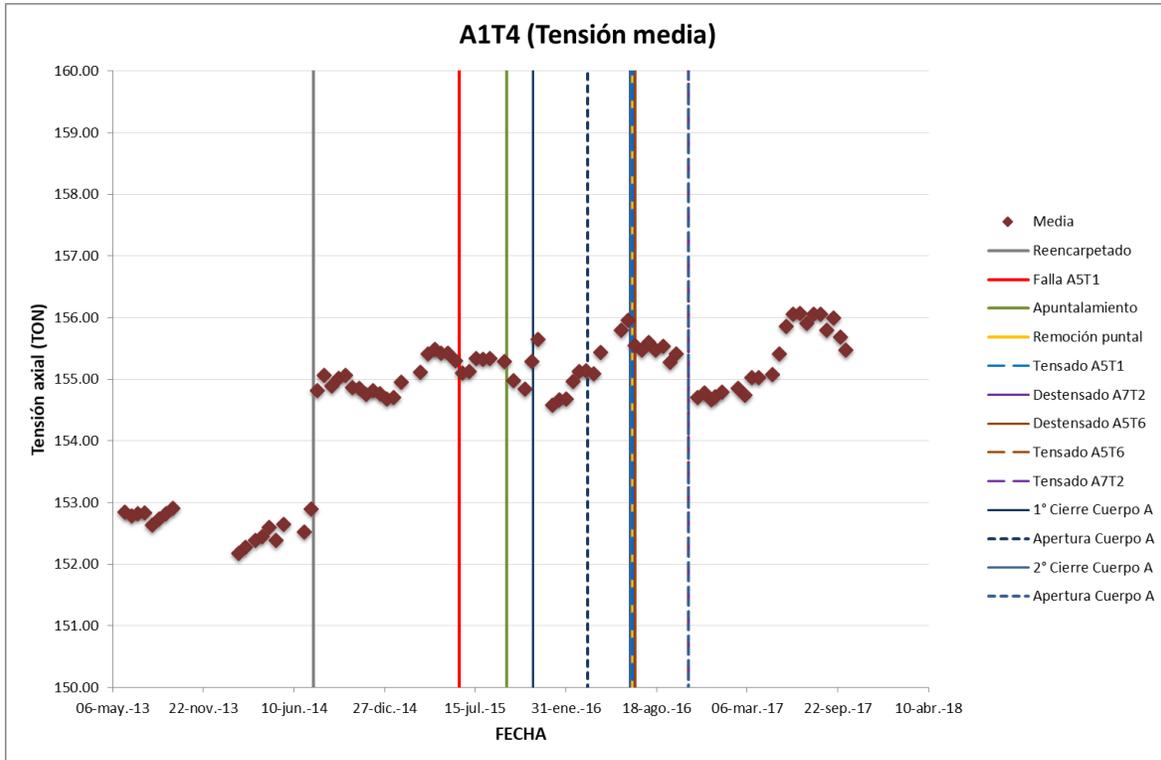


Figura 3.31 Tensión del tirante 4 de la semi-arpa 1

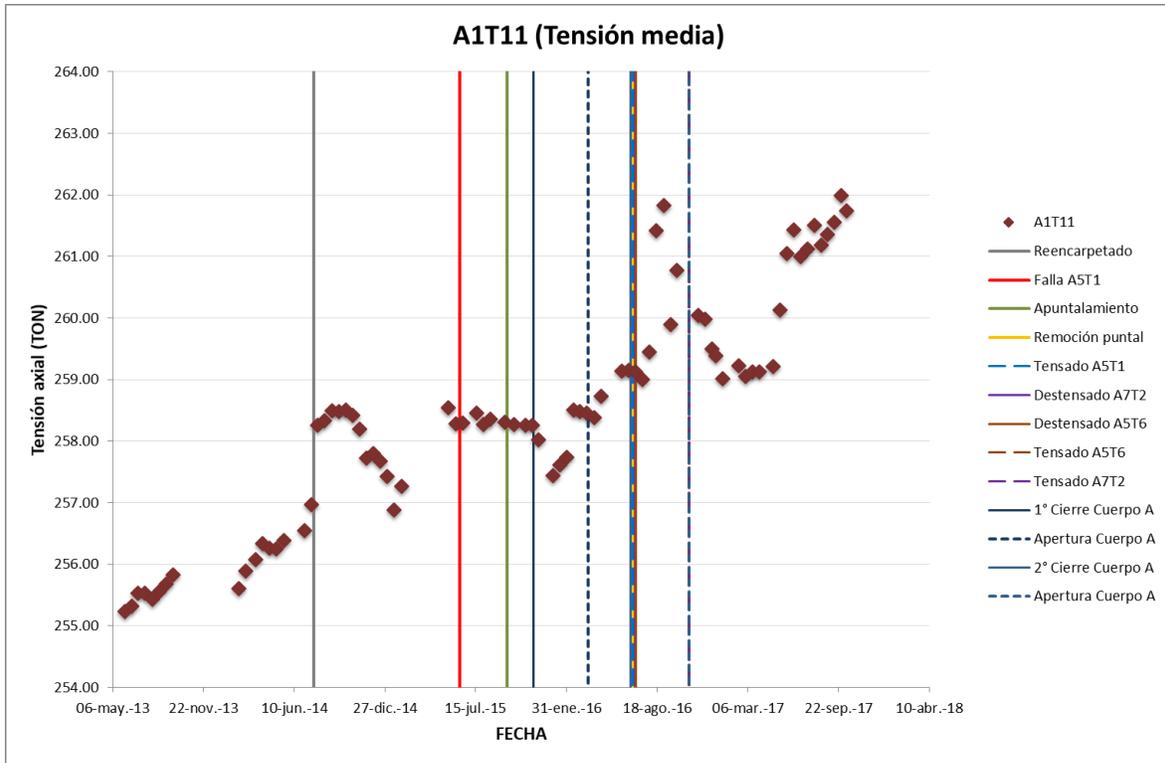


Figura 3.32 Tensión del tirante 11 de la semi-arpa 1

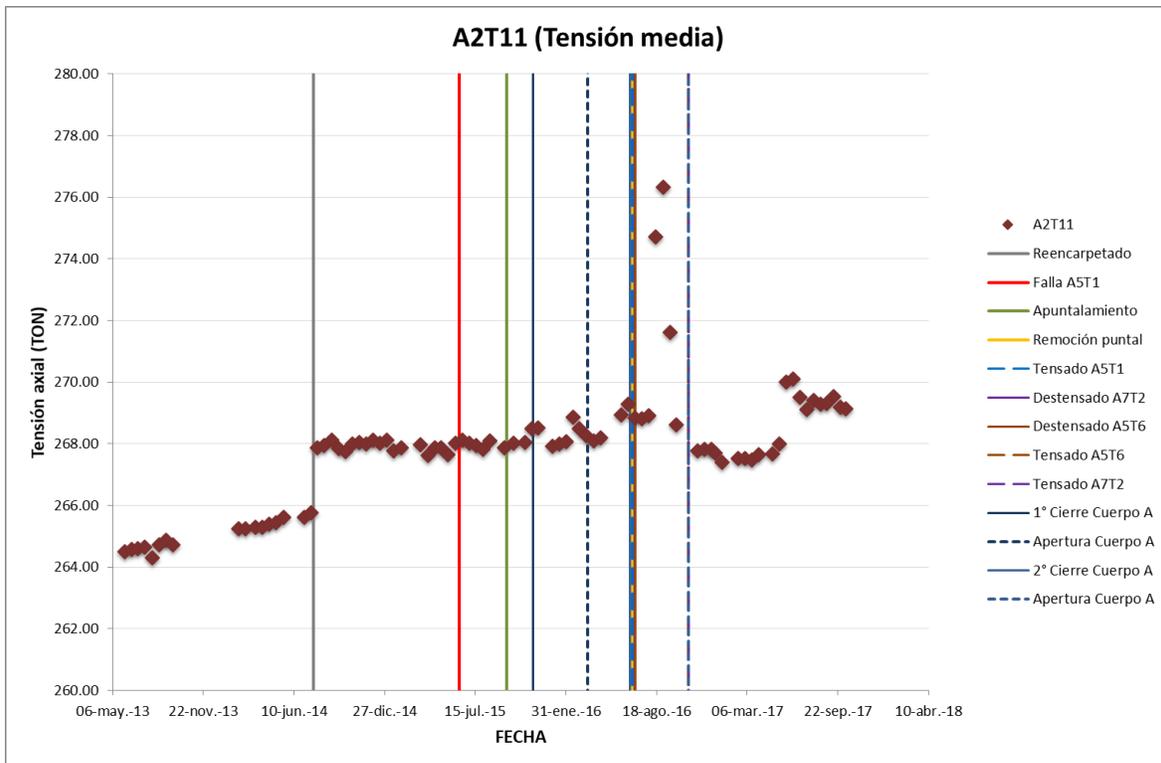


Figura 3.33 Tensión del tirante 11 de la semi-arpa 2

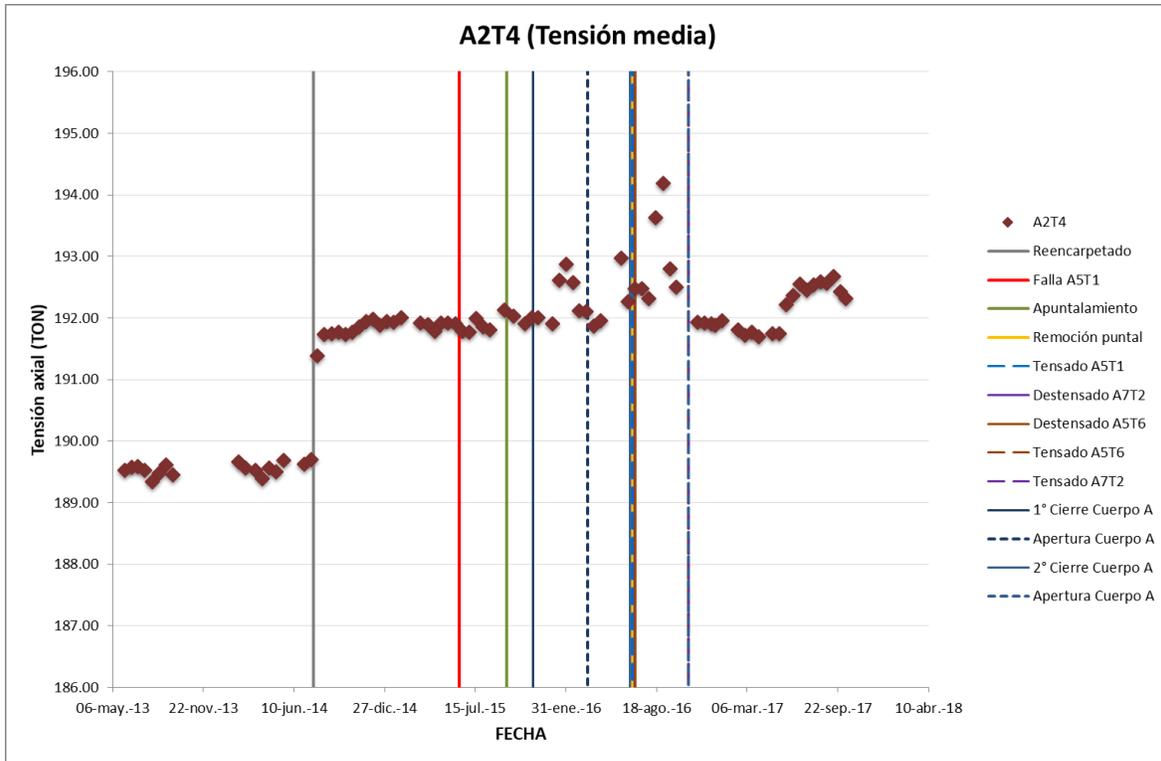


Figura 3.34 Tensión del tirante 4 de la semi-arpa 2

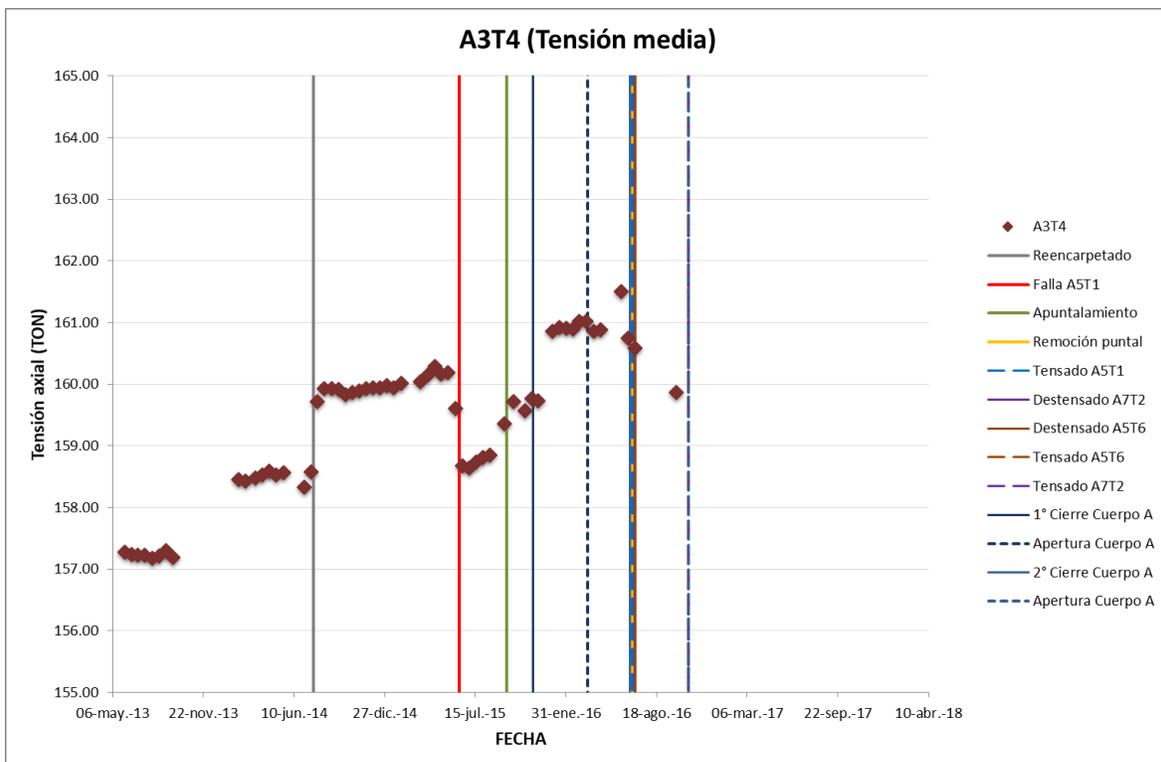


Figura 3.35 Tensión del tirante 4 de la semi-arpa 3

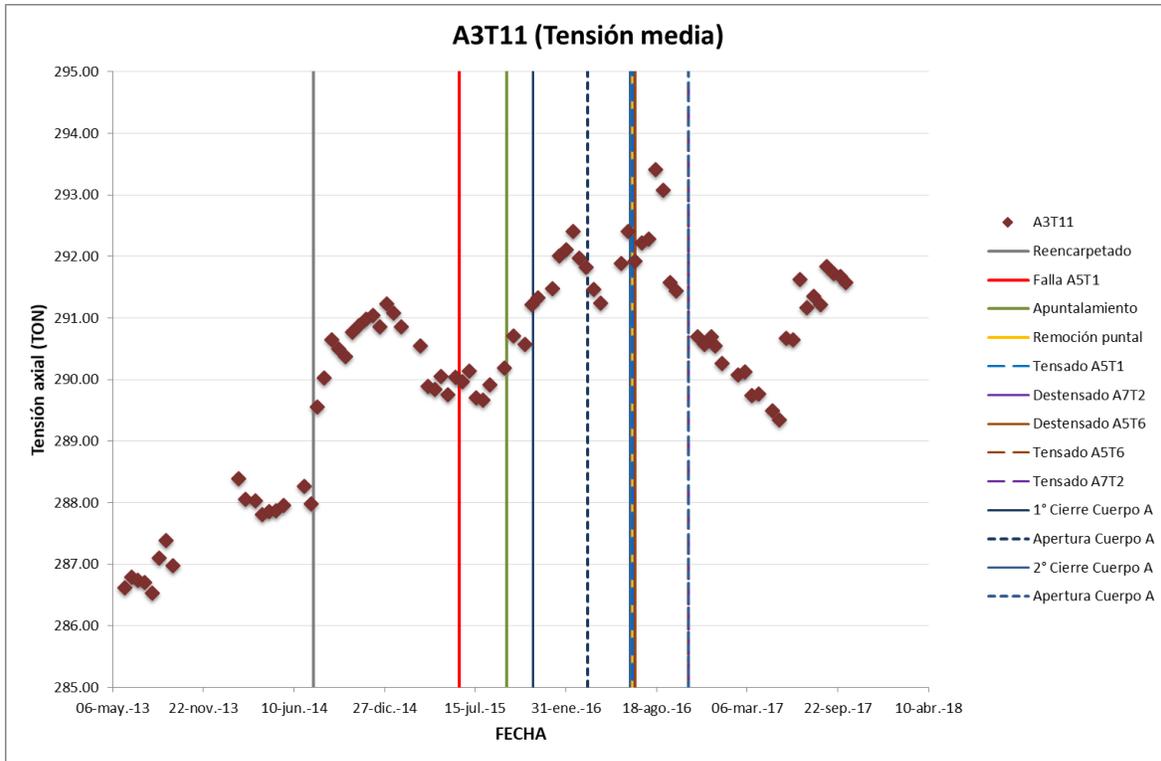


Figura 3.36 Tensión del tirante 11 de la semi-arpa 3

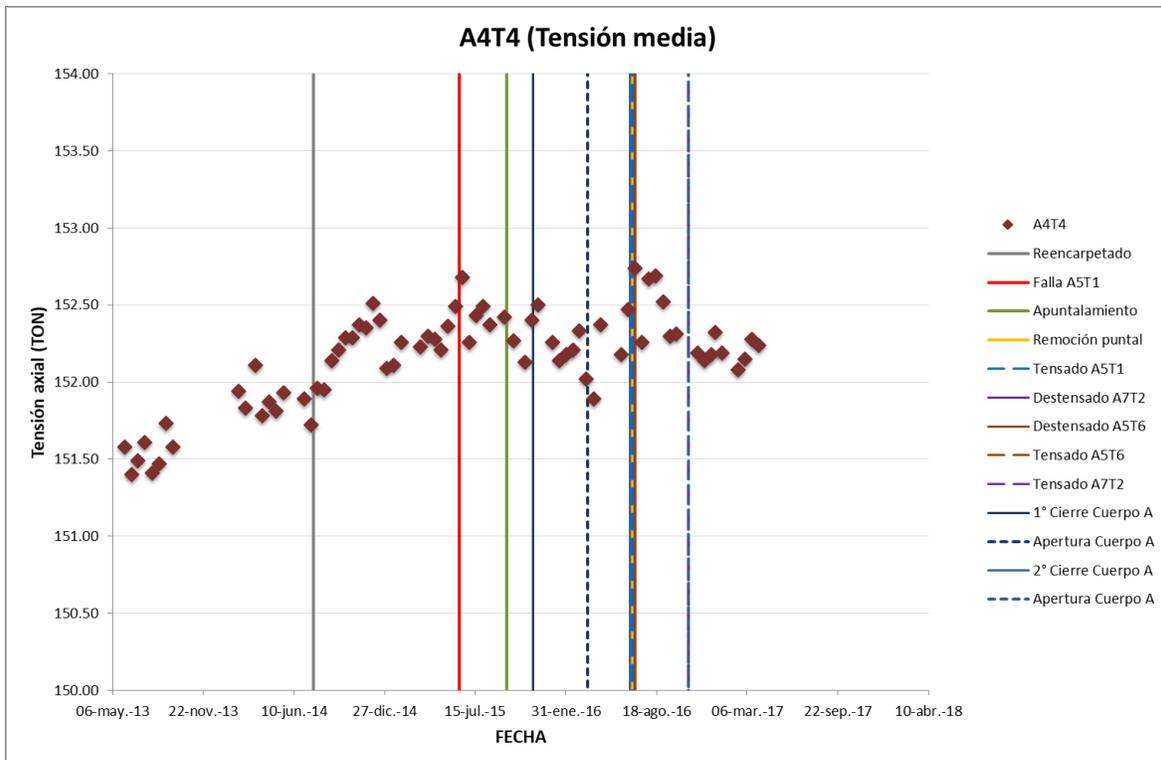


Figura 3.37 Tensión del tirante 4 de la semi-arpa 4

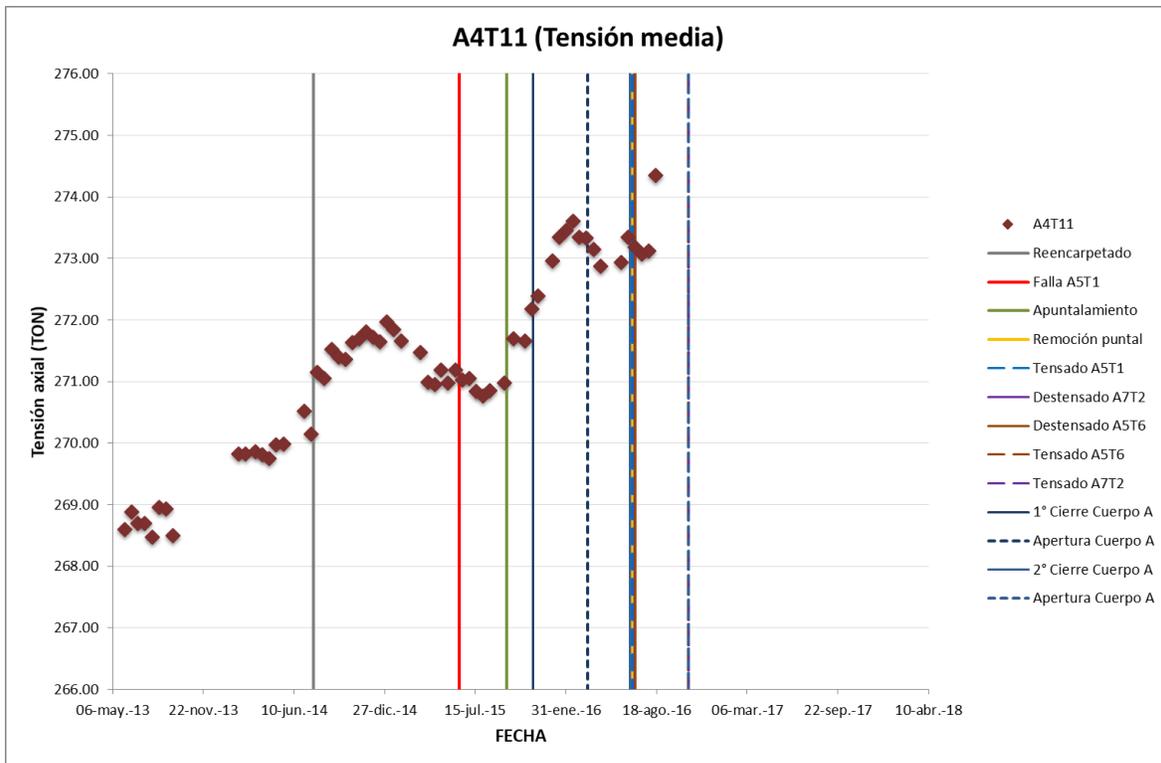


Figura 3.38 Tensión del tirante 11 de la semi-arpa 4

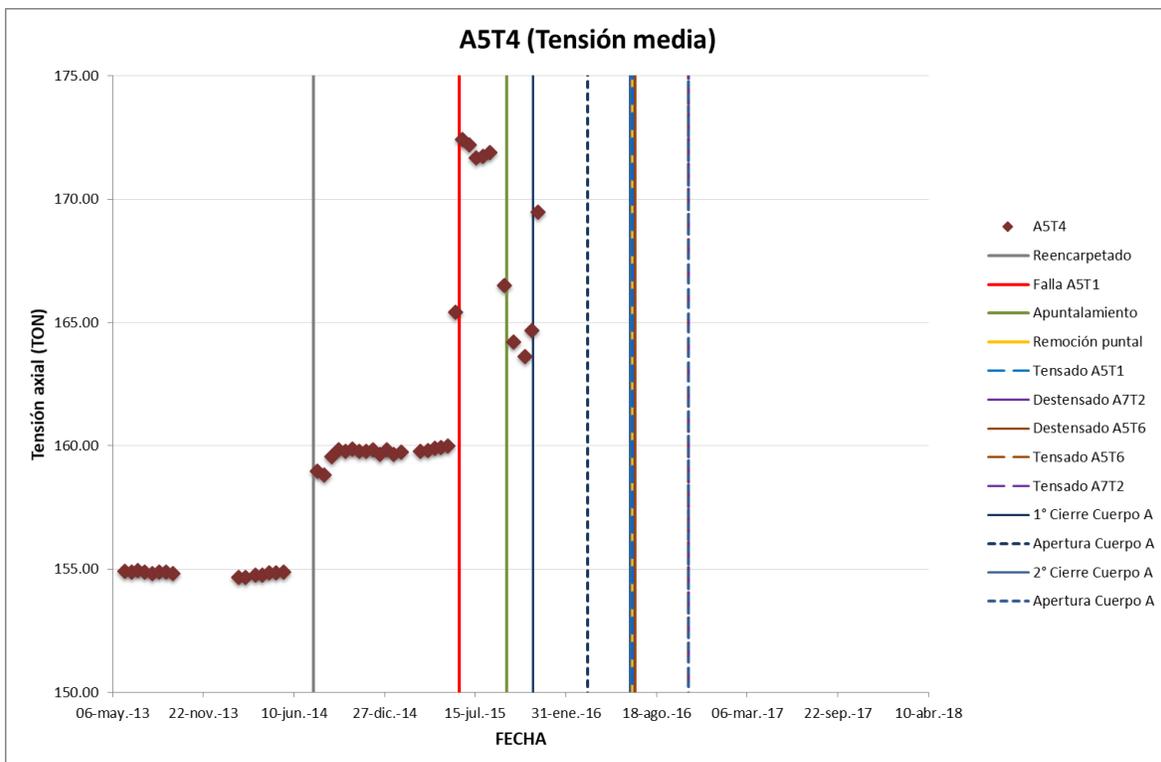


Figura 3.39 Tensión del tirante 4 de la semi-arpa 5

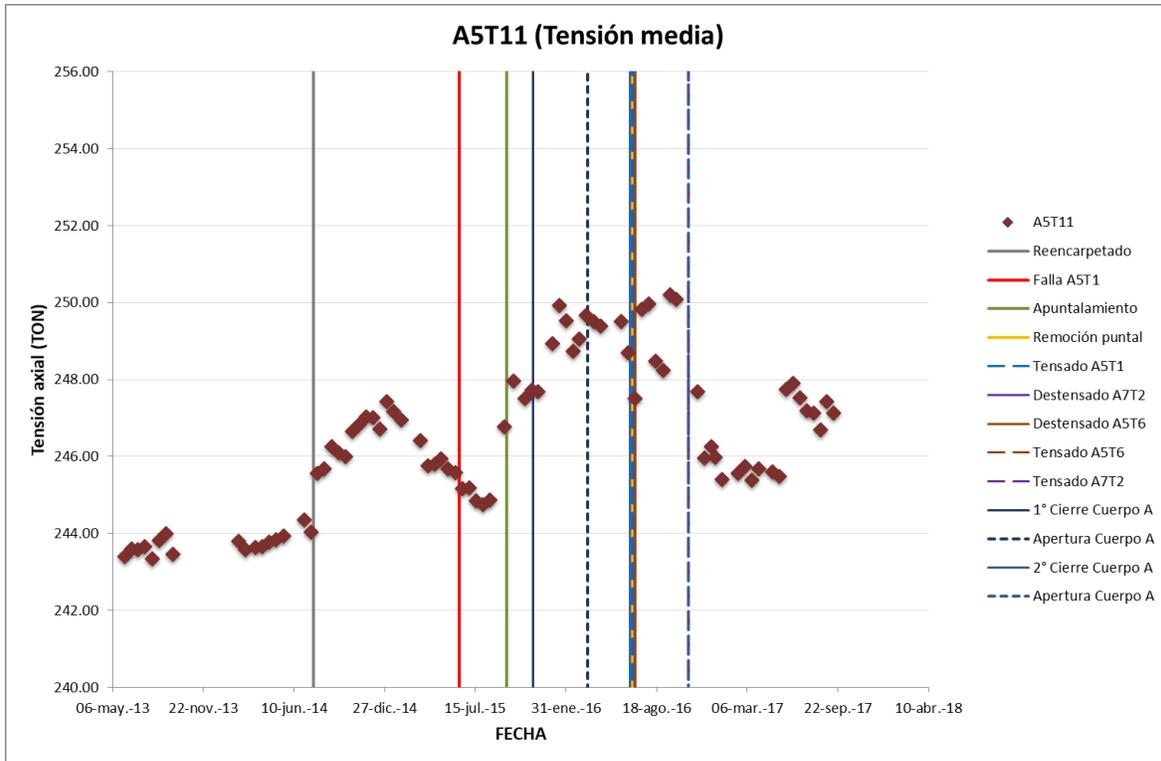


Figura 3.40 Tensión del tirante 11 de la semi-arpa 5

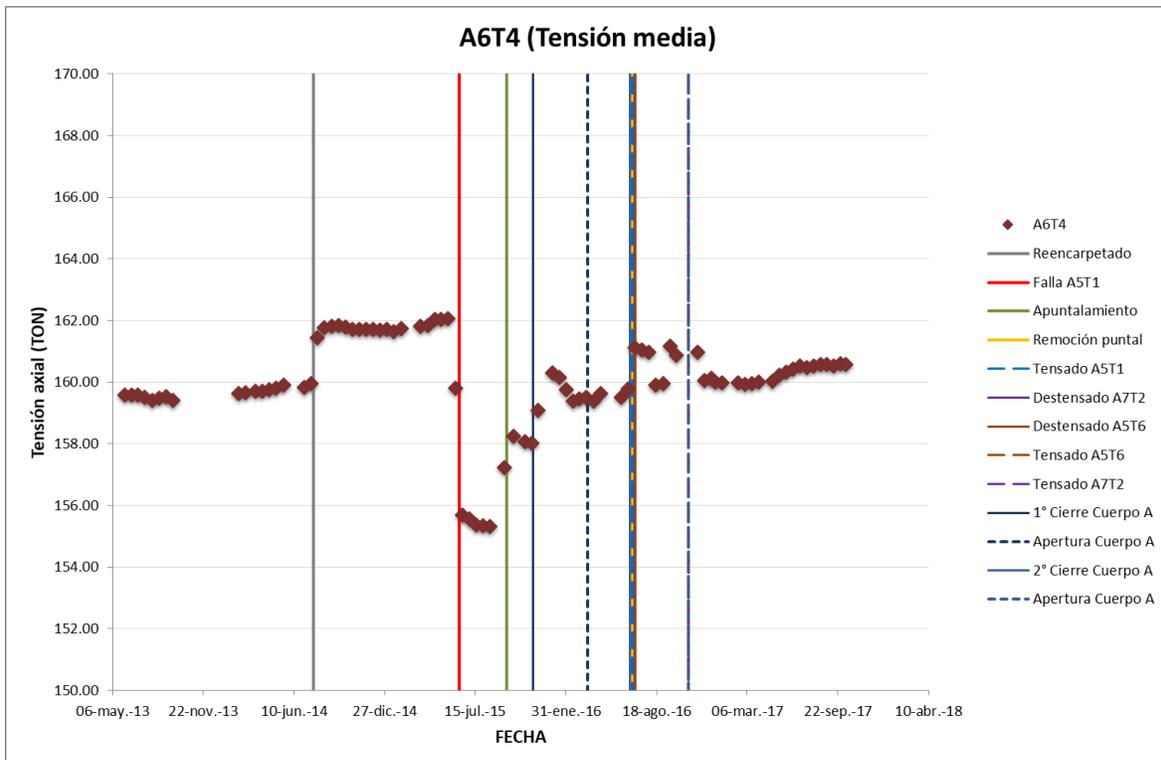


Figura 3.41 Tensión del tirante 4 de la semi-arpa 6

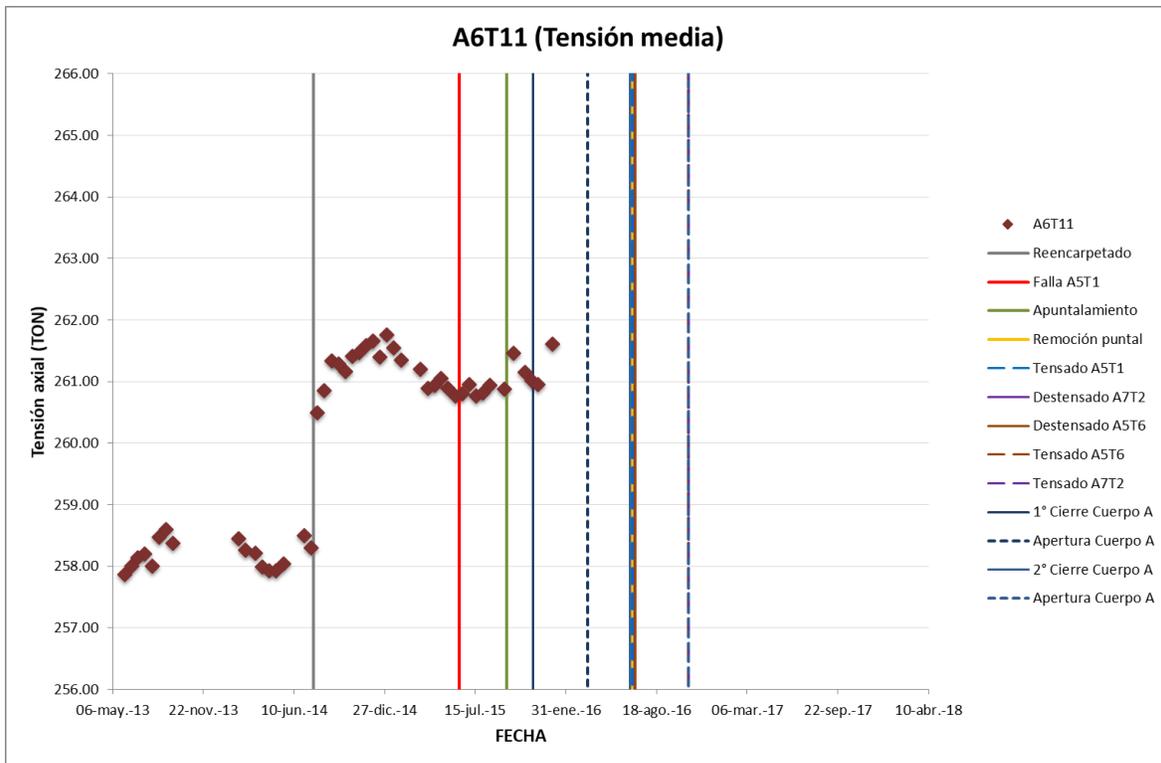


Figura 3.42 Tensión del tirante 11 de la semi-arpa 6

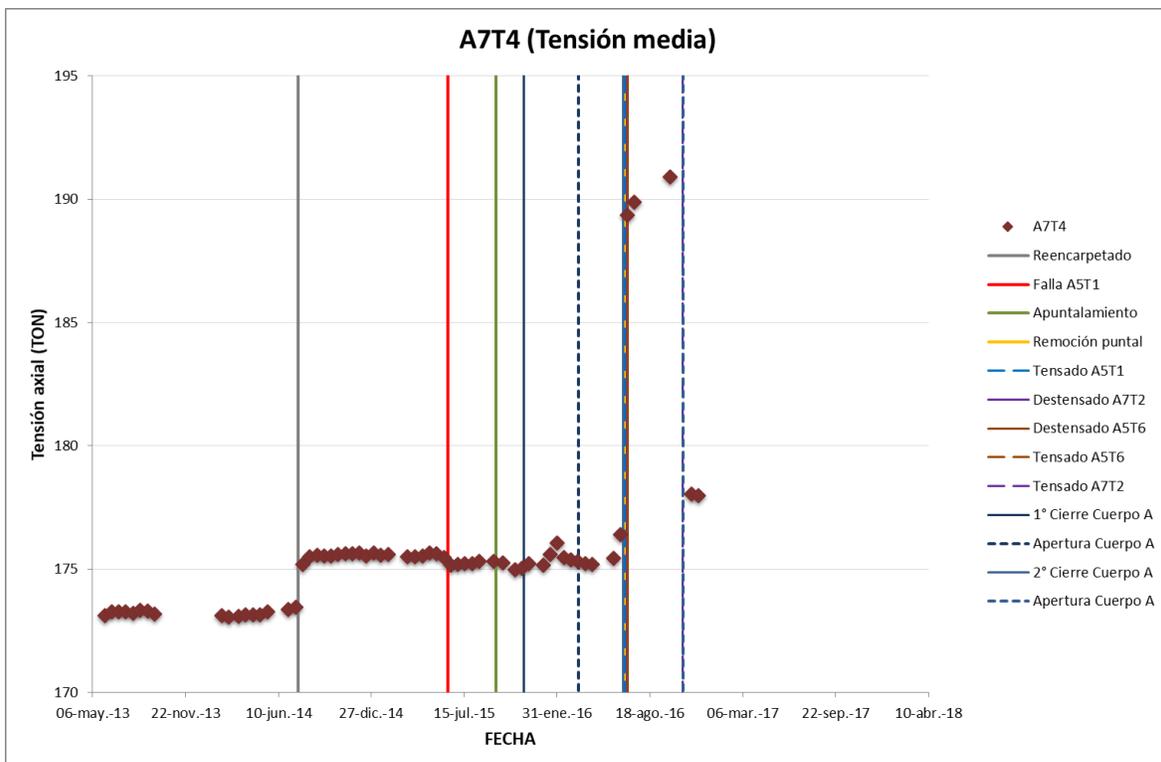


Figura 3.43 Tensión del tirante 4 de la semi-arpa 7

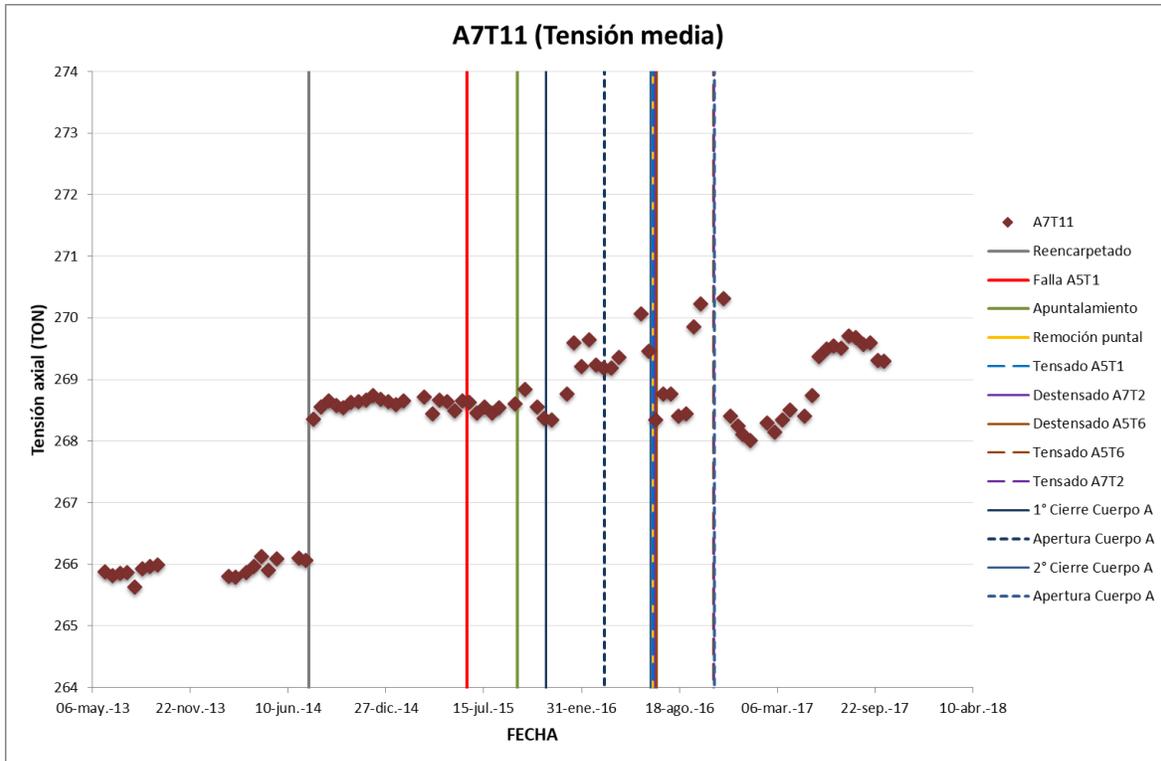


Figura 3.44 Tensión del tirante 11 de la semi-arpa 7

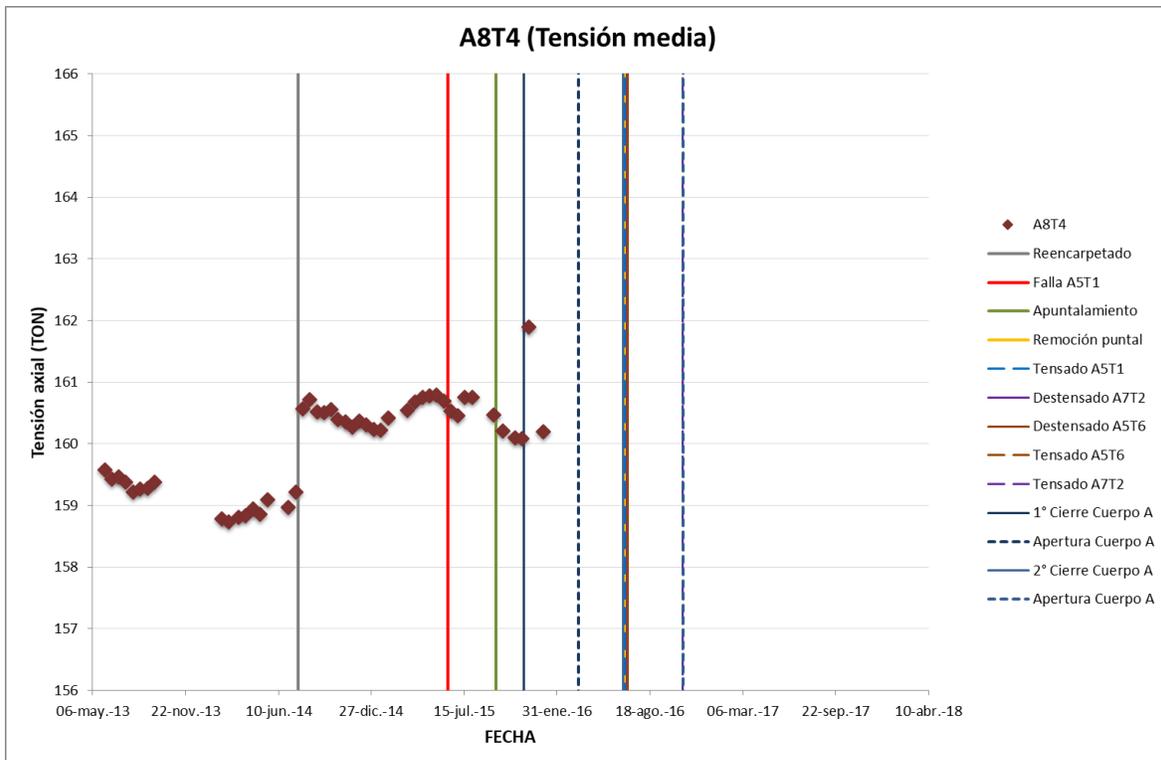


Figura 3.45 Tensión del tirante 4 de la semi-arpa 8

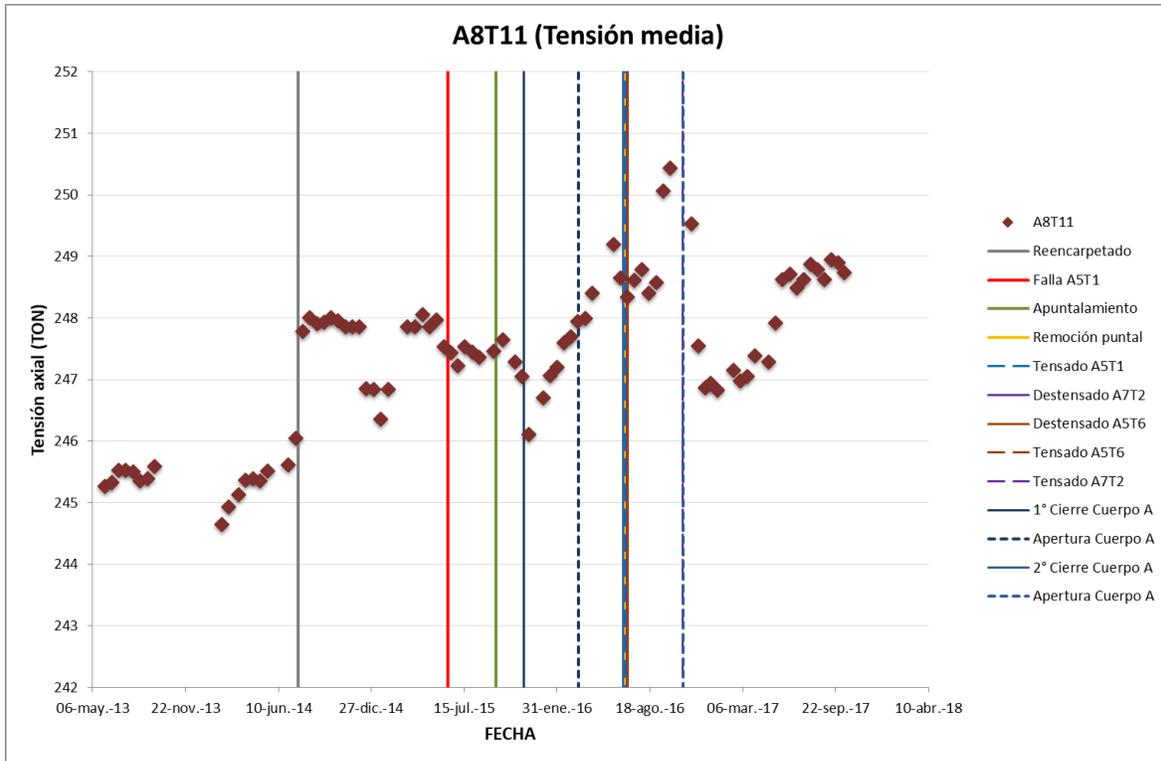


Figura 3.46 Tensión del tirante 11 de la semi-arpa 8

Una vez concluidos los mantenimientos del Puente Río Papaloapan; fue determinada la tensión de los 112 tirantes a través del cálculo de las frecuencias naturales de cada cable. Para obtener las frecuencias, se registró la respuesta dinámica de cada tirante con acelerómetros temporales para este propósito.

Para estas pruebas se utiliza un equipo portátil de medición de vibraciones con un acelerómetro piezoeléctrico de baja frecuencia. Con este equipo se miden las vibraciones de los tirantes durante 2 minutos, bajo condiciones normales de operación del puente. De la medición de vibraciones, se identifican las frecuencias naturales de los 3 primeros modos de vibrar de cada uno de los 112 tirantes y utilizando un modelo calibrado para cada tirante se calcula la tensión correspondiente [8]. La tabla 3.1 muestra los valores de las tensiones correspondientes al pesaje dinámico final, una vez concluidos los trabajos de rehabilitación.

Tabla 3.1 Tensión en los tirantes del Puente Río Papaloapan finales

Tirante	Semi-Arpa (Tensión en toneladas)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	212	201	198	209	196	193	228	200
2	110	120	129	126	132	124	99	118
3	149	174	174	154	156	187	165	145
4	152	190	159	148	159	161	177	157
5	176	191	172	158	154	170	189	166
6	180	196	175	185	185	180	194	175
7	191	216	213	202	203	189	205	200
8	222	227	222	234	234	237	224	224
9	242	246	246	259	241	231	236	229
10	256	253	275	278	260	278	252	244
11	256	269	288	274	240	266	266	250
12	253	268	278	283	295	304	278	256
13	221	265	283	259	248	278	234	223
14	272	210	229	248	288	278	182	264

El valor de las tensiones de cada semi-arpa con los límites de diseño y máximas de proyecto para cada tirante se pueden ver en los gráficos 3.47 a 3. 54.

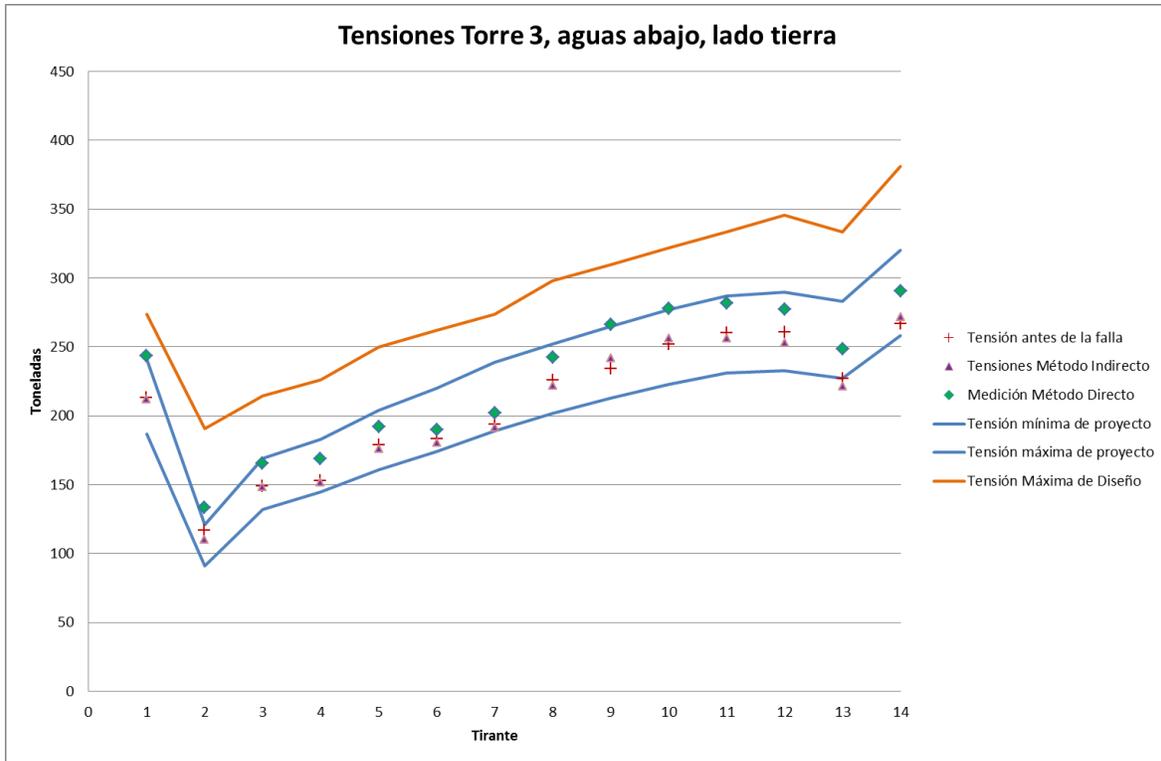


Figura 3.47 Semi-arpa 1

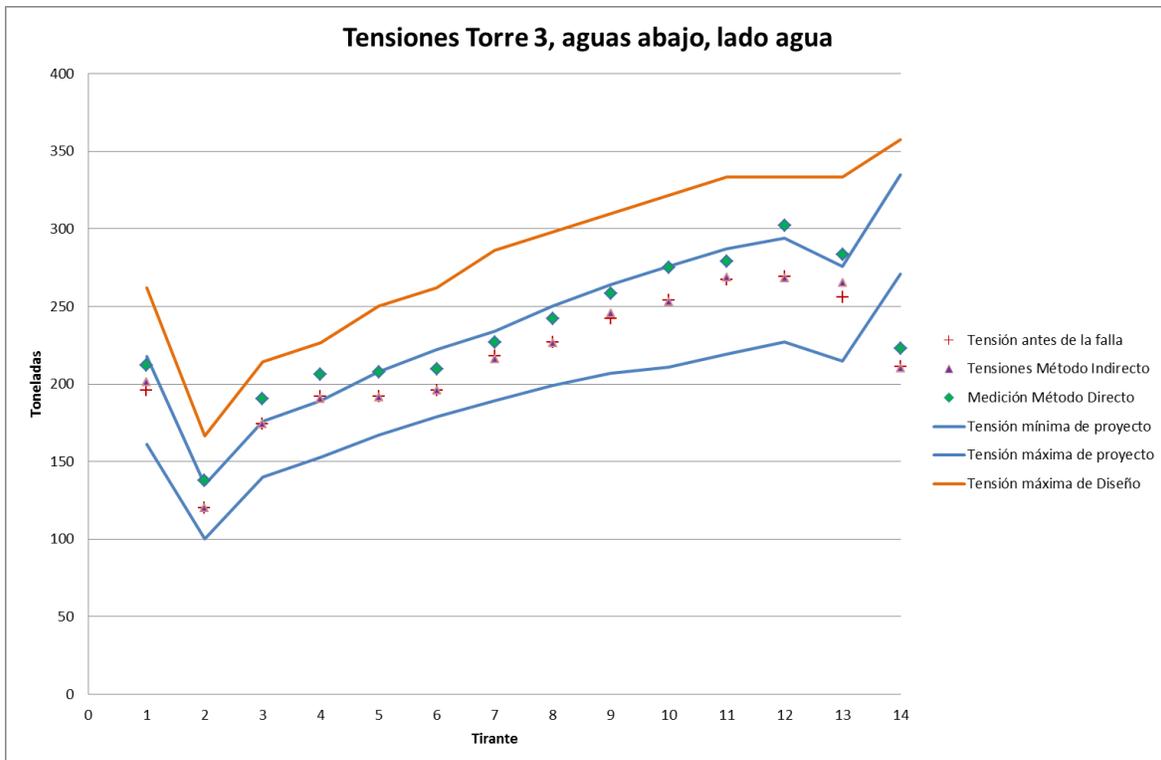


Figura 3.48 Semi-arpa 2

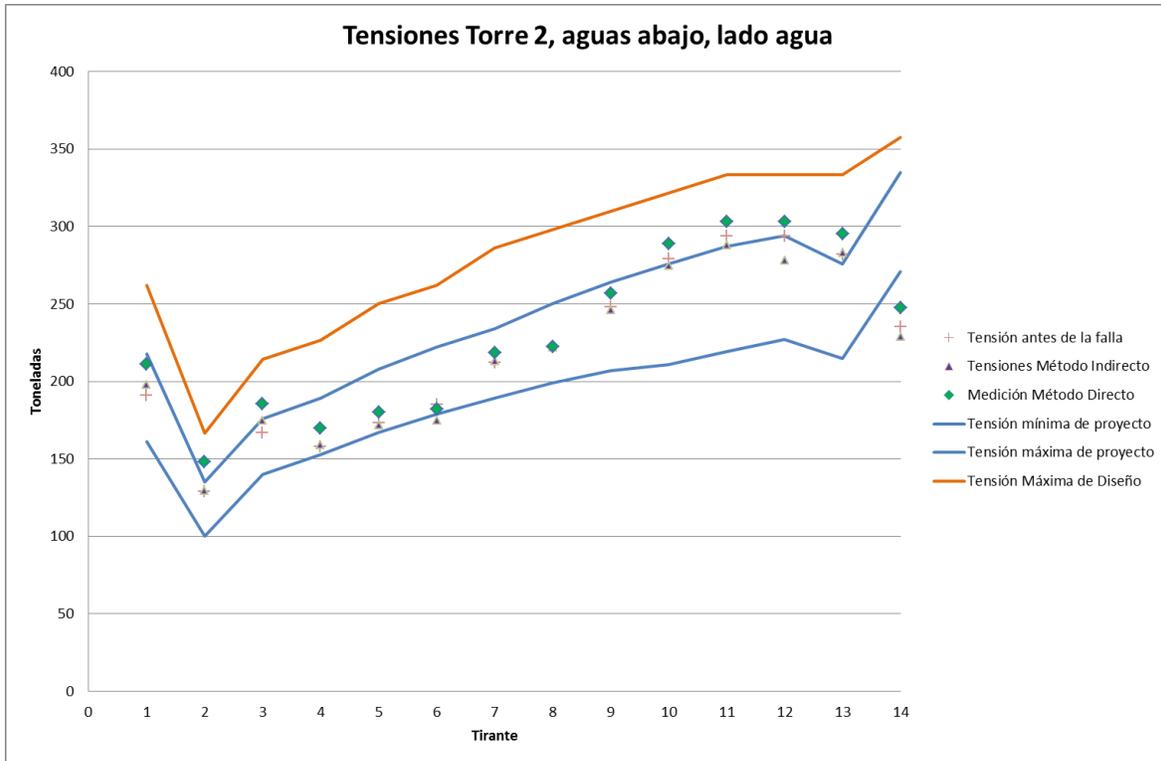


Figura 3.49 Semi-arpa 3

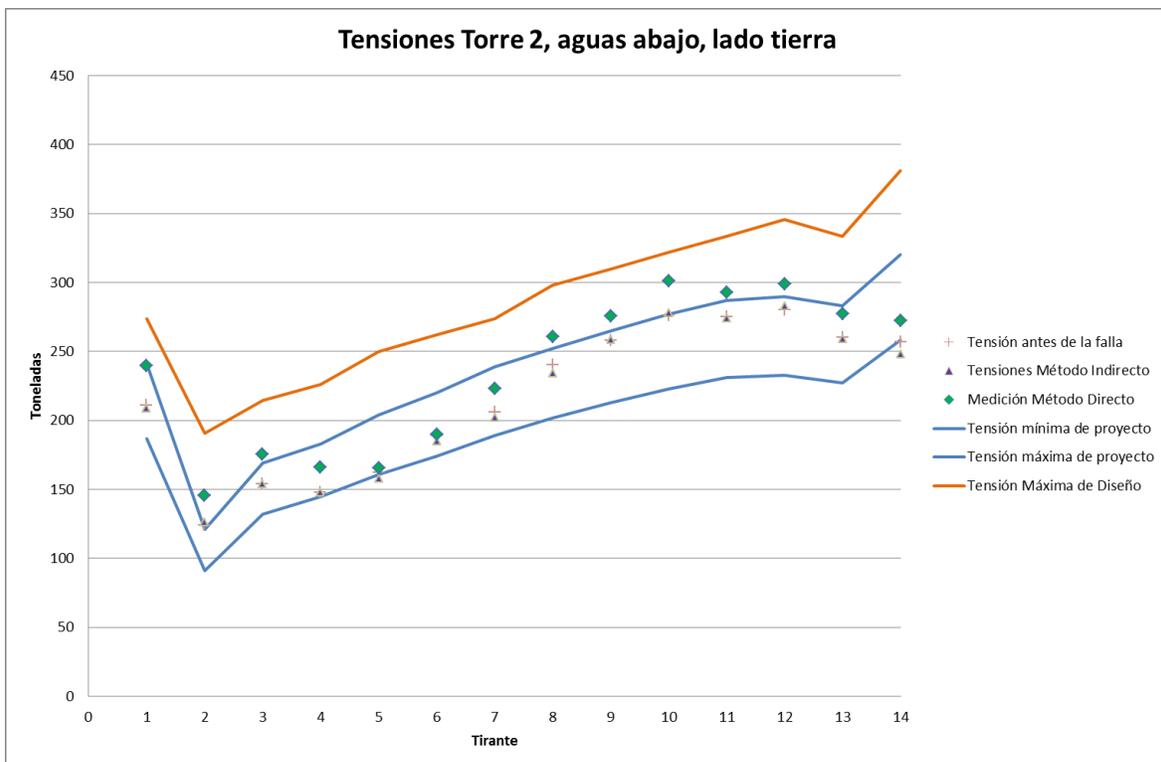


Figura 3.50 Semi-arpa 4

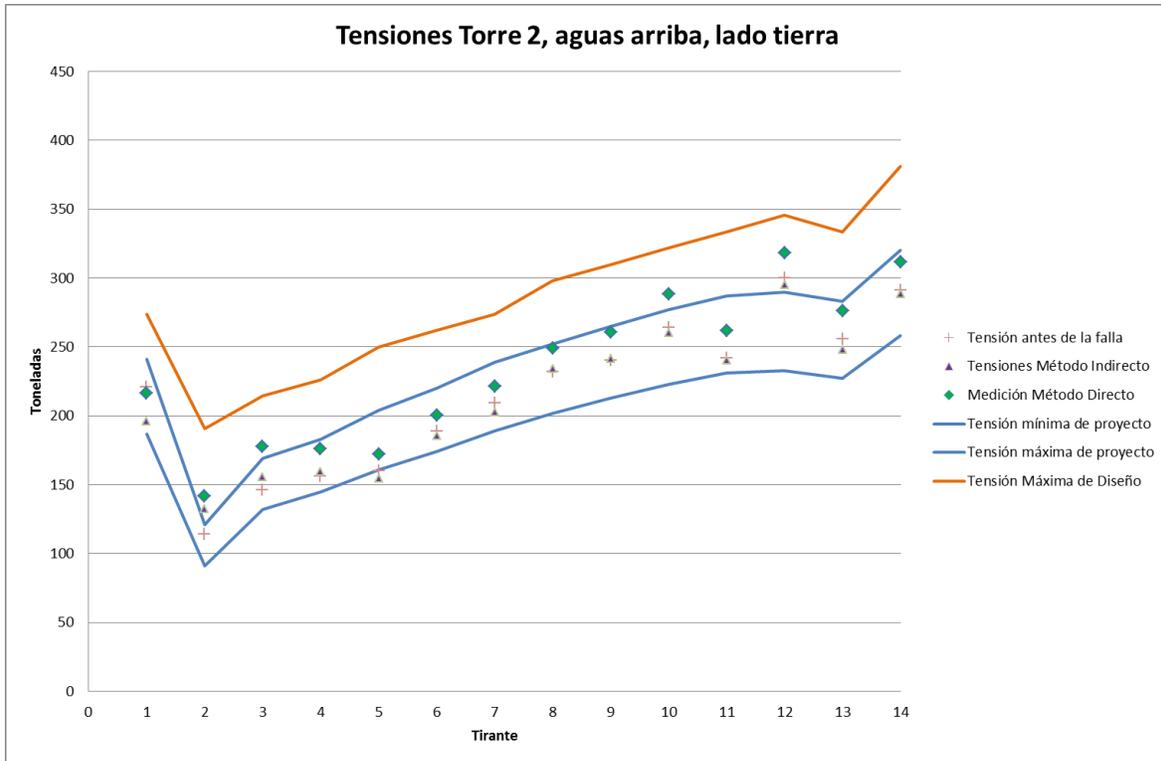


Figura 3.51 Semi-arpa 5

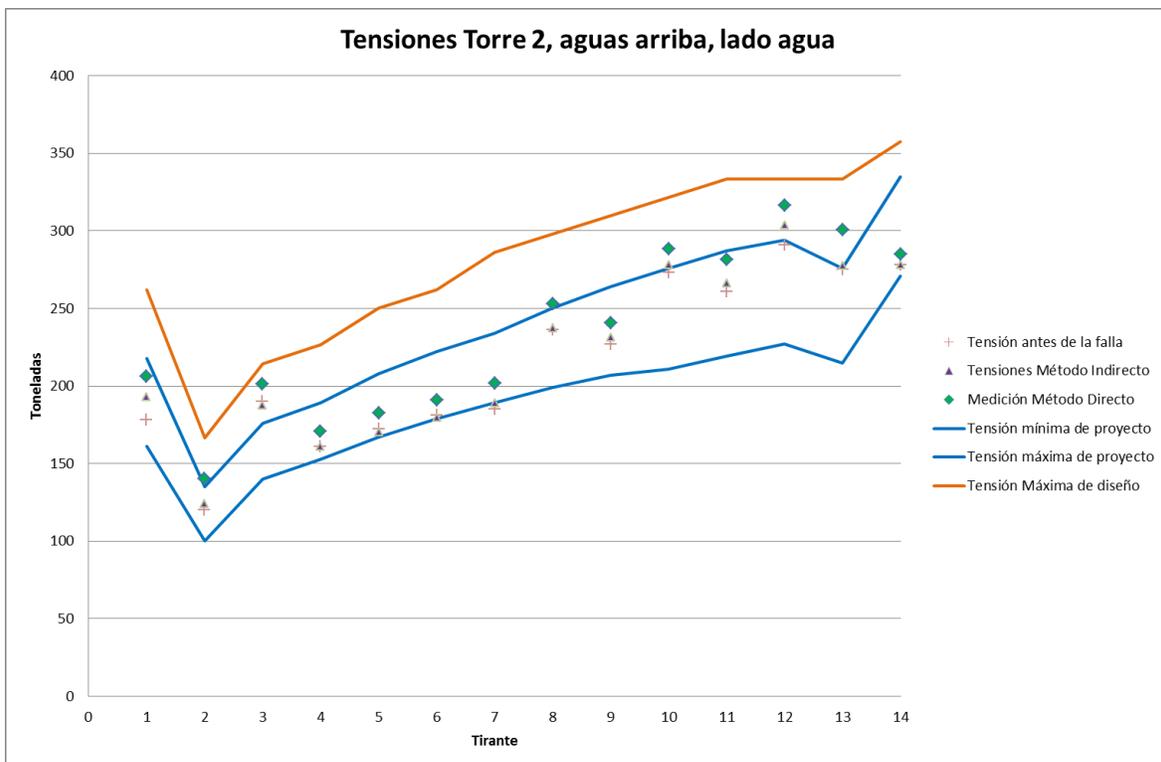


Figura 3.52 Semi-arpa 6

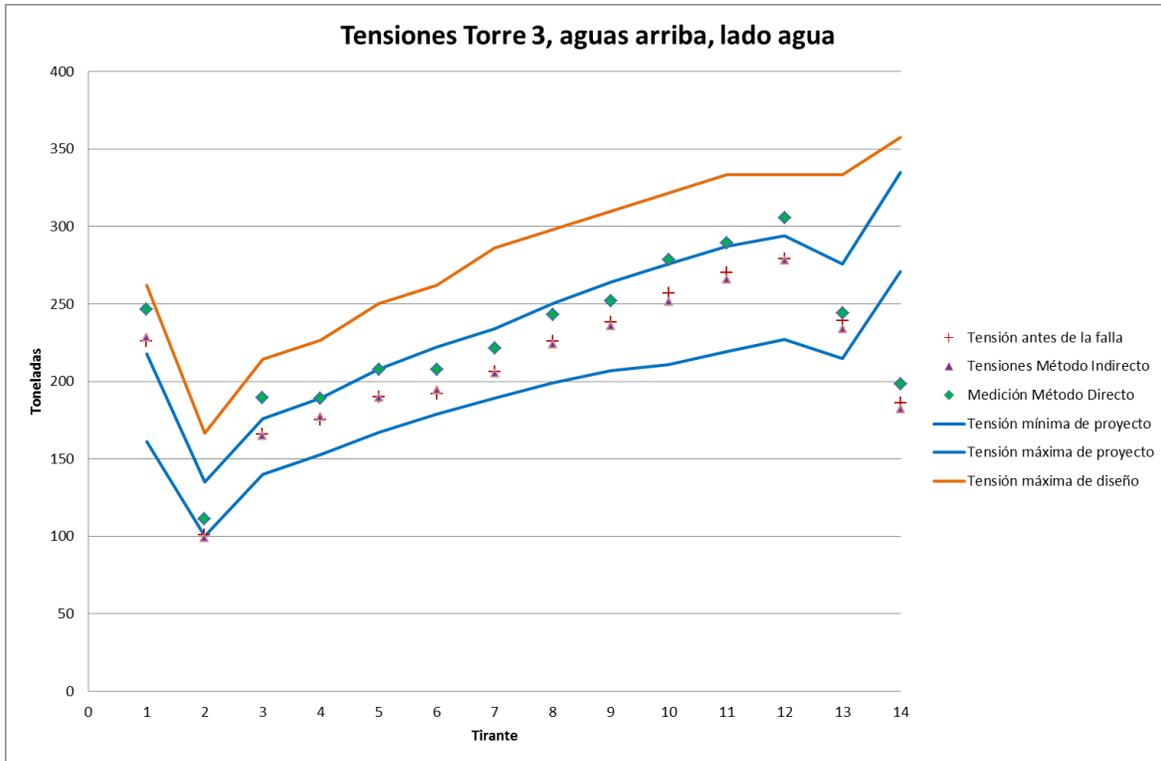


Figura 3.53 Semi-arpa 7

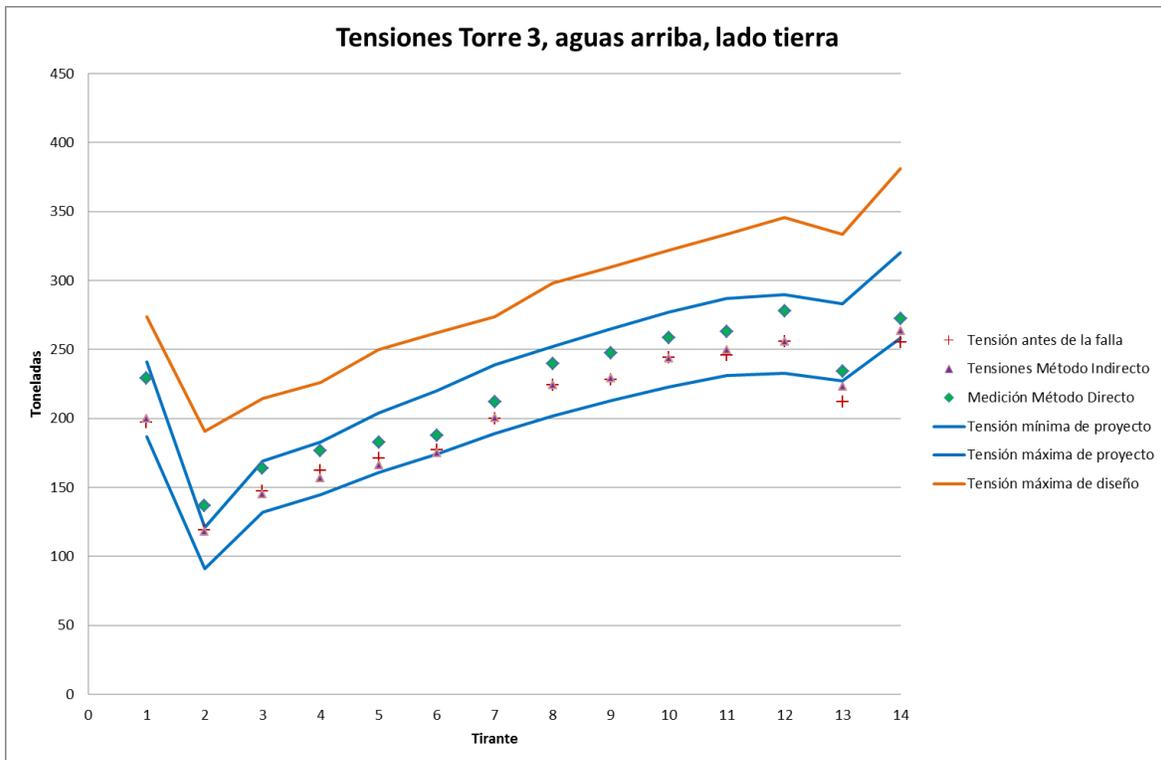


Figura 3.54 Semi-arpa 8

De las mediciones dinámicas realizadas y de los gráficos anteriores, podemos concluir que existen diferencias en las tensiones del pesaje dinámico directo e indirecto (efectuadas utilizando sistemas hidráulicos) no mayores a 21%; en general las mediciones realizadas a través del pesaje directo registran tensiones más altas a las registradas con el método indirecto.

Otro de las variables a considerar durante el monitoreo estructural del puente Río Papaloapan es el valor de la media estadística de las cargas vivas, el cual es un parámetro bastante sensible a los mantenimientos realizados y a las estrategias implementadas después de la falla del tirante 1 de la semi-arpa 5; las cuales consistieron en cierres parciales de los cuerpos A y B. 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. Los datos corresponden a bloques de 15 días de medición, y todos los sensores, para cargas vivas, cumplen con una distribución estadística del tipo Gauss Inversa.

Las figuras de la 3.55 a la 3.102 muestran el valor de la media de cada sensor a tensión y compresión desde el año 2012.

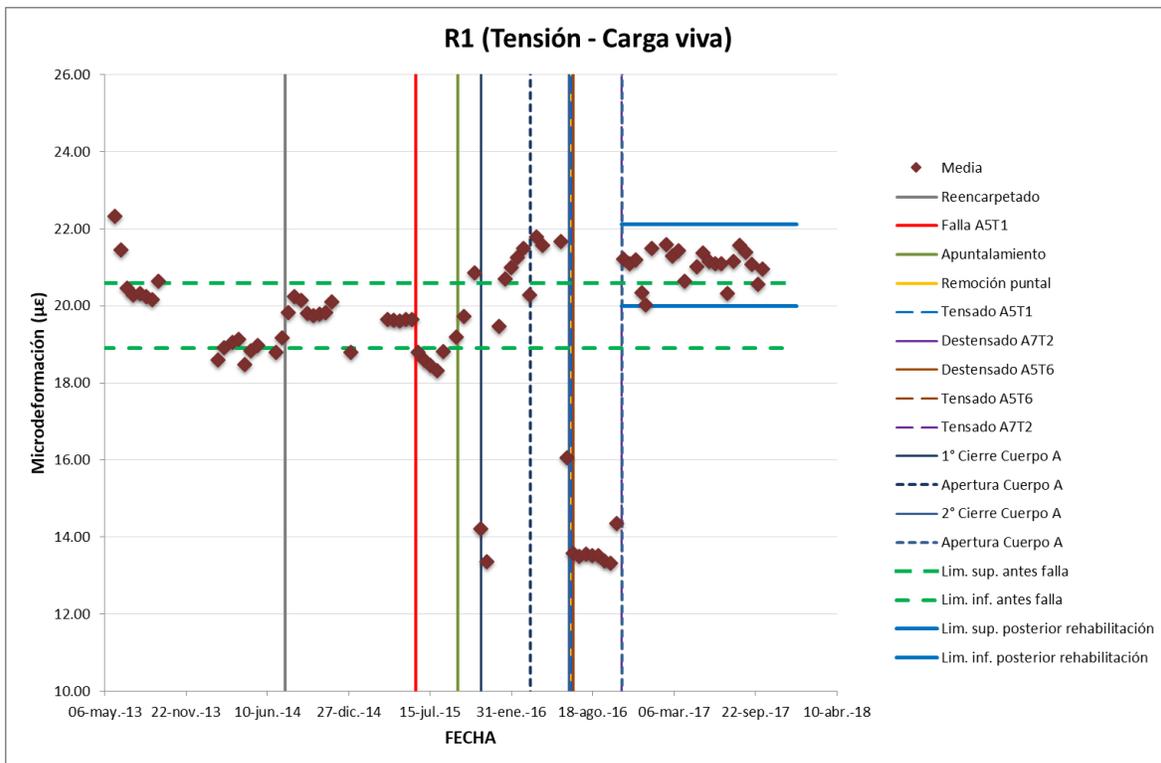


Figura 3.55 Media estadística del extensómetro R1 a tensión

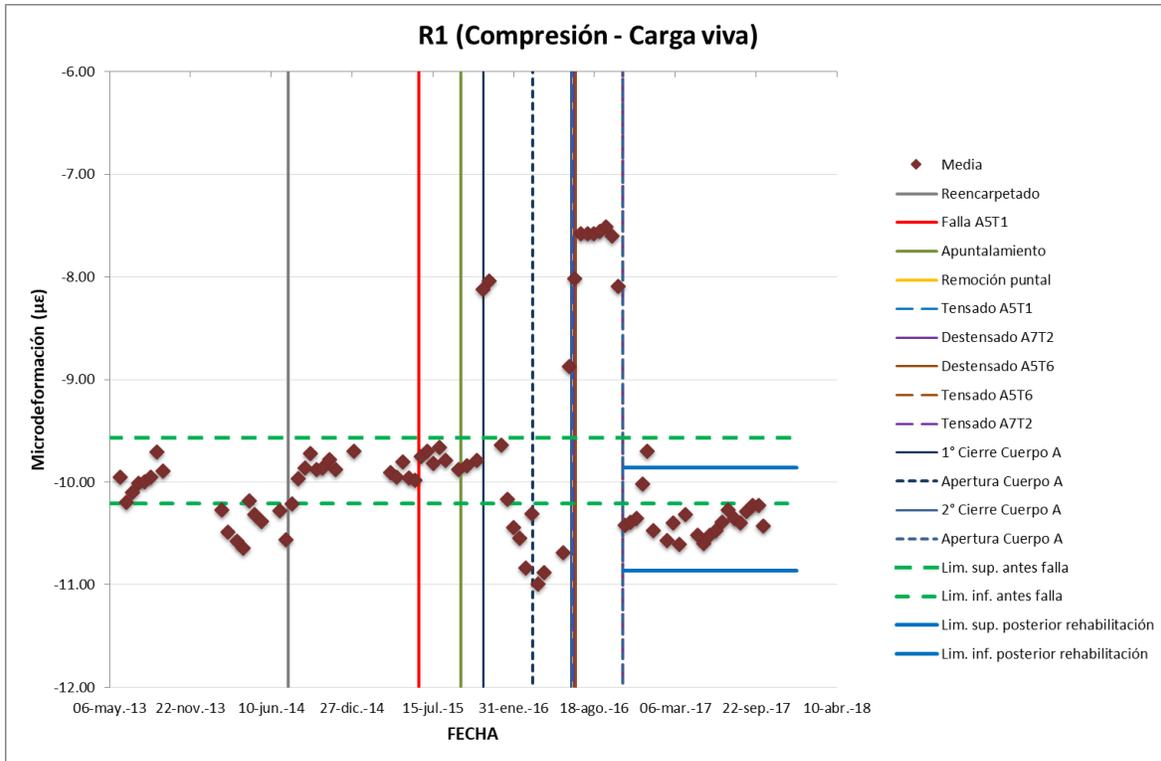


Figura 3.56 Media estadística del extensómetro R1 a compresión

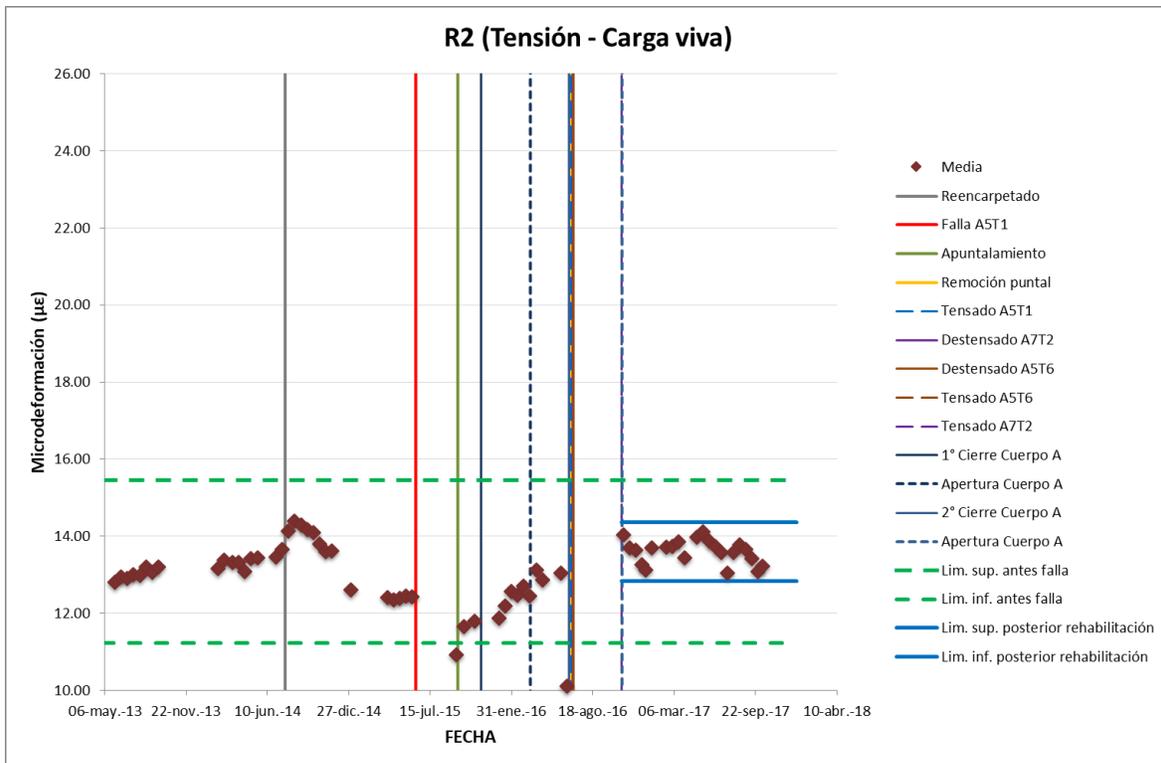


Figura 3.57 Media estadística del extensómetro R2 a tensión

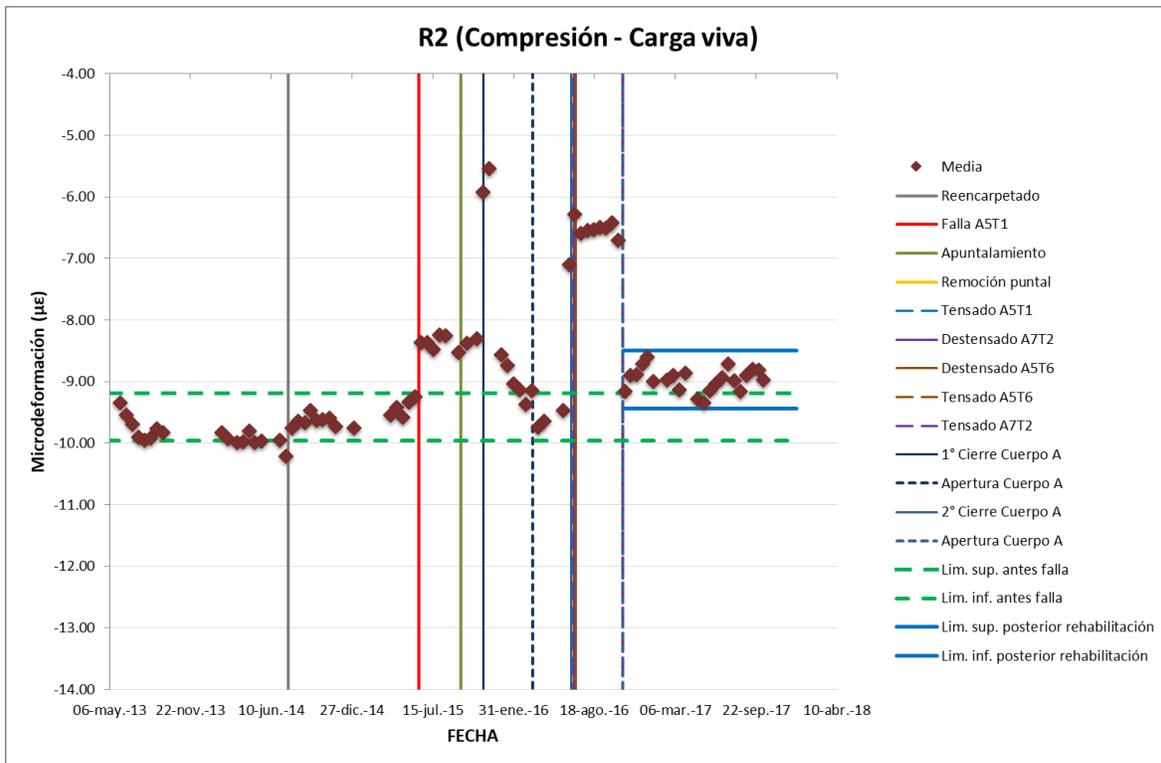


Figura 3.58 Media estadística del extensómetro R2 a compresión

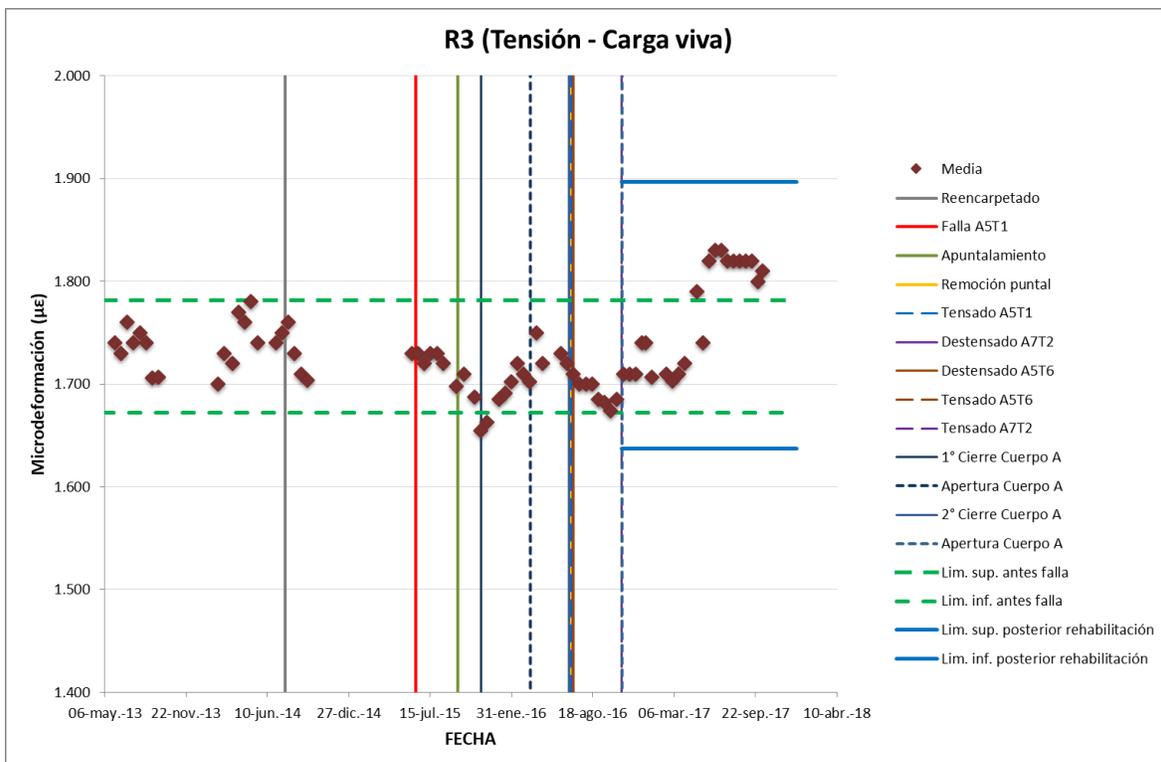


Figura 3.59 Media estadística del extensómetro R3 a tensión

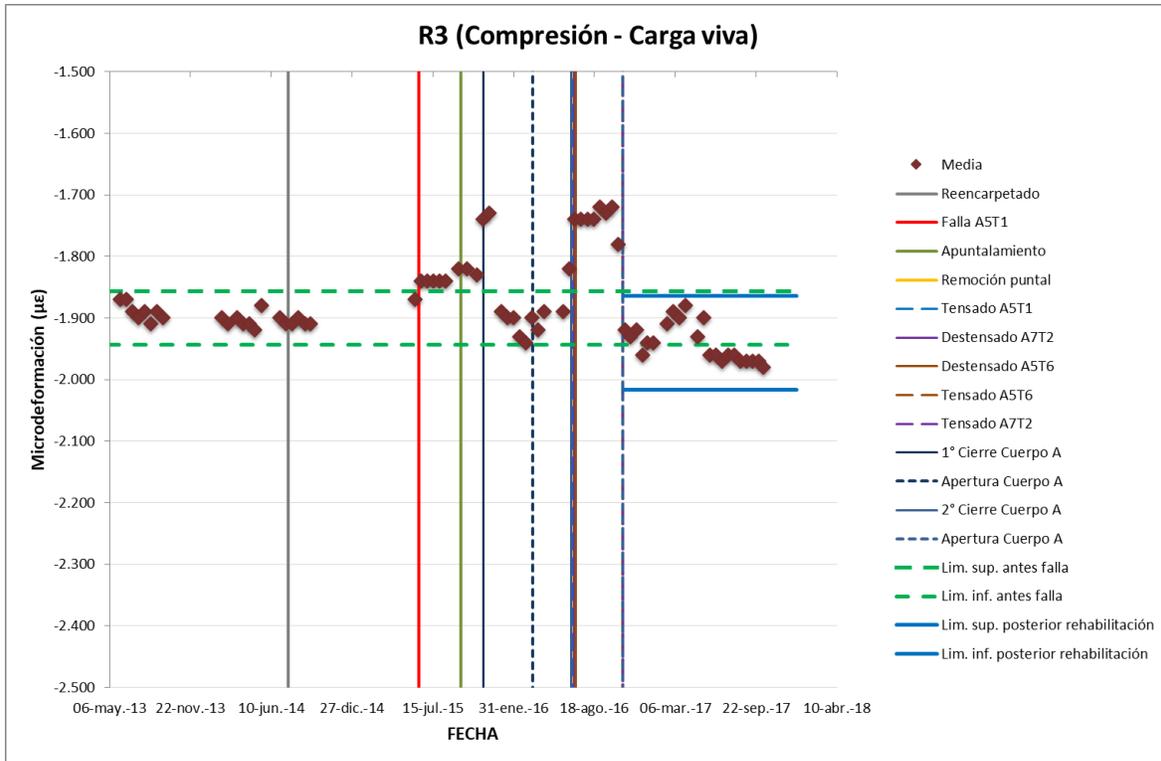


Figura 3.60 Media estadística del extensómetro R3 a compresión

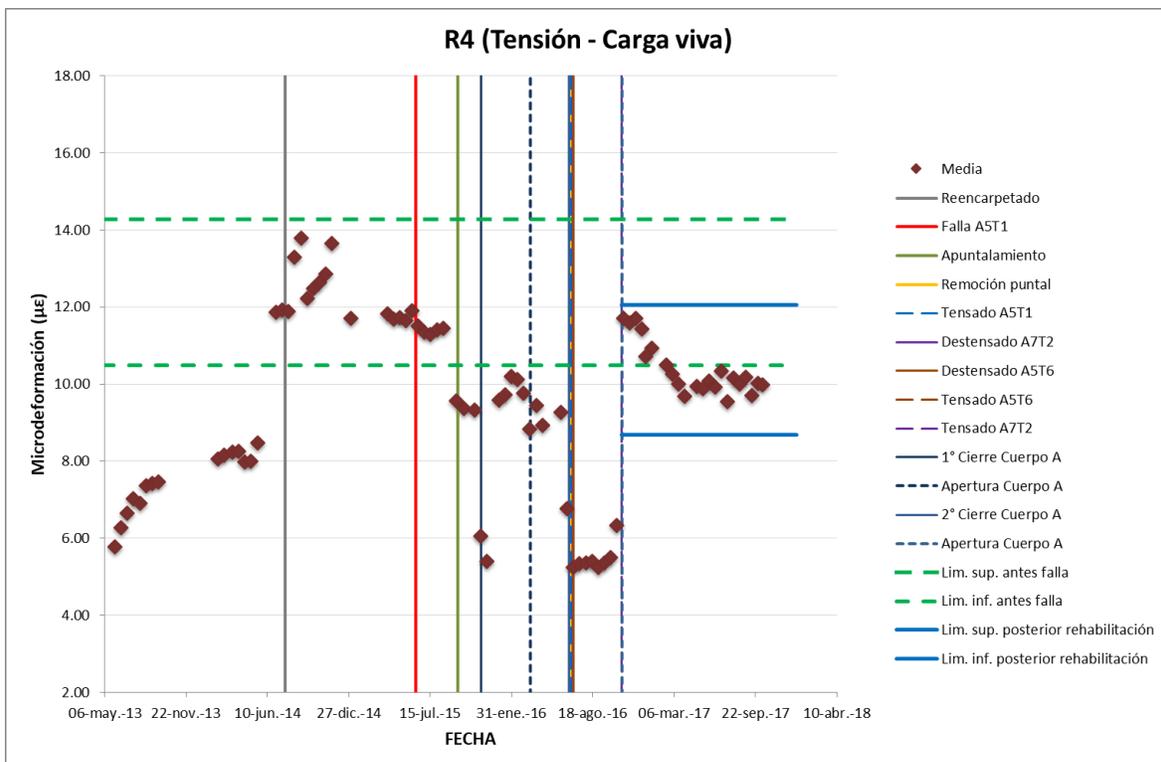


Figura 3.61 Media estadística del extensómetro R4 a tensión

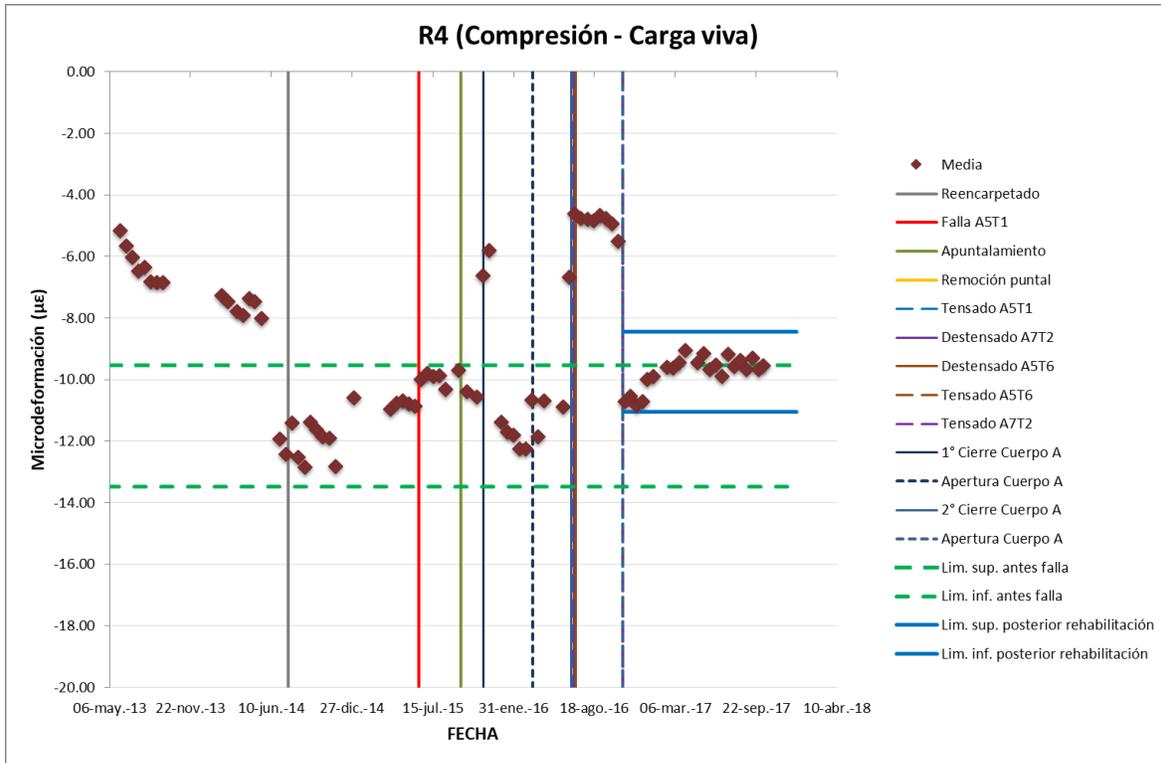


Figura 3.62 Media estadística del extensómetro R4 a compresión

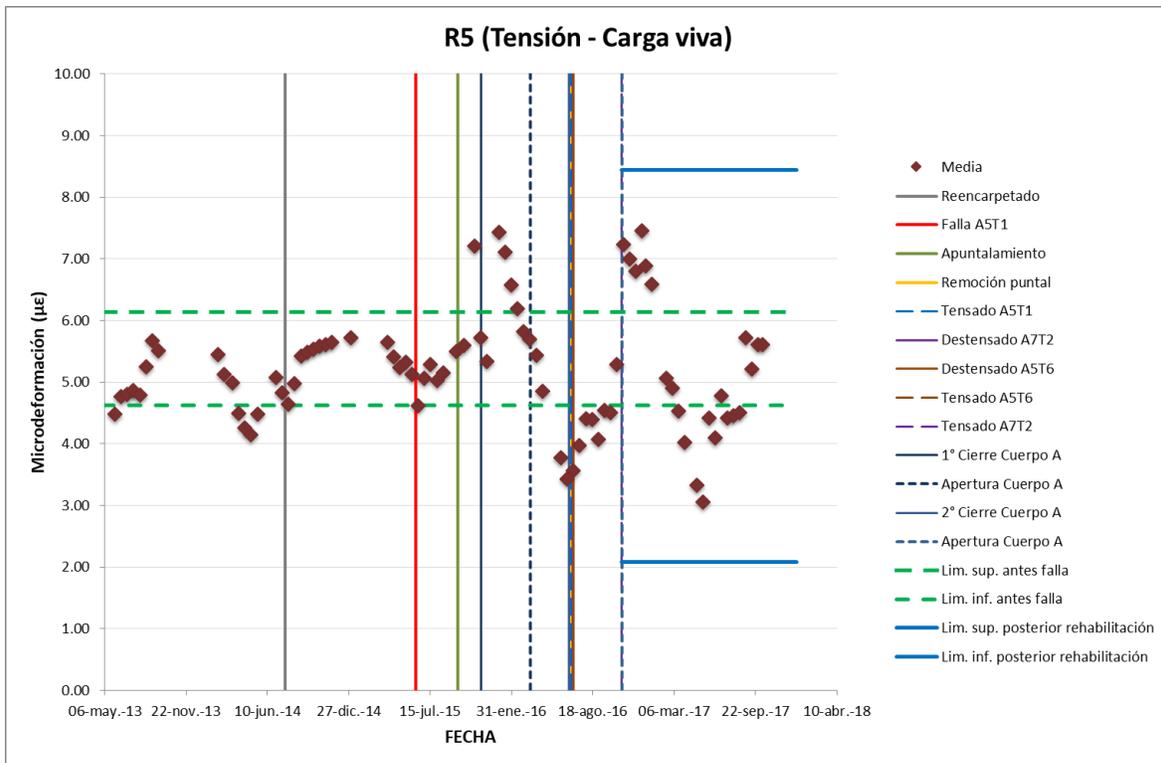


Figura 3.63 Media estadística del extensómetro R5 a tensión

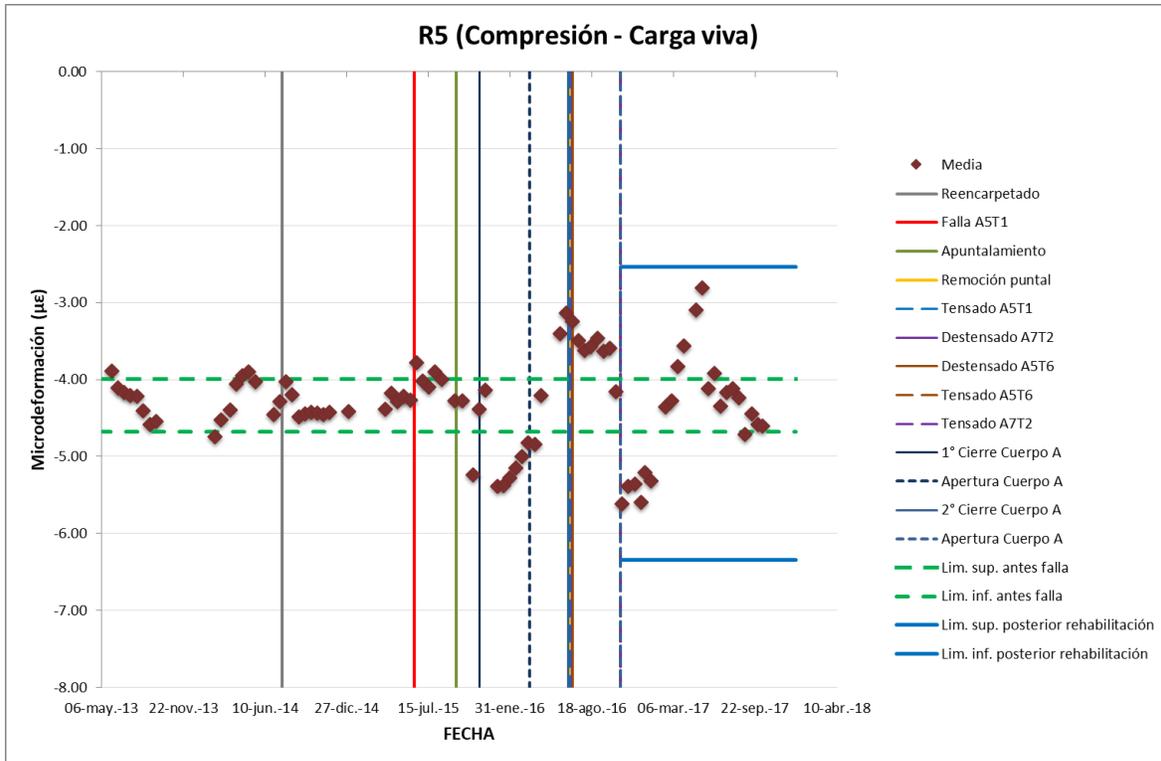


Figura 3.64 Media estadística del extensómetro R5 a compresión

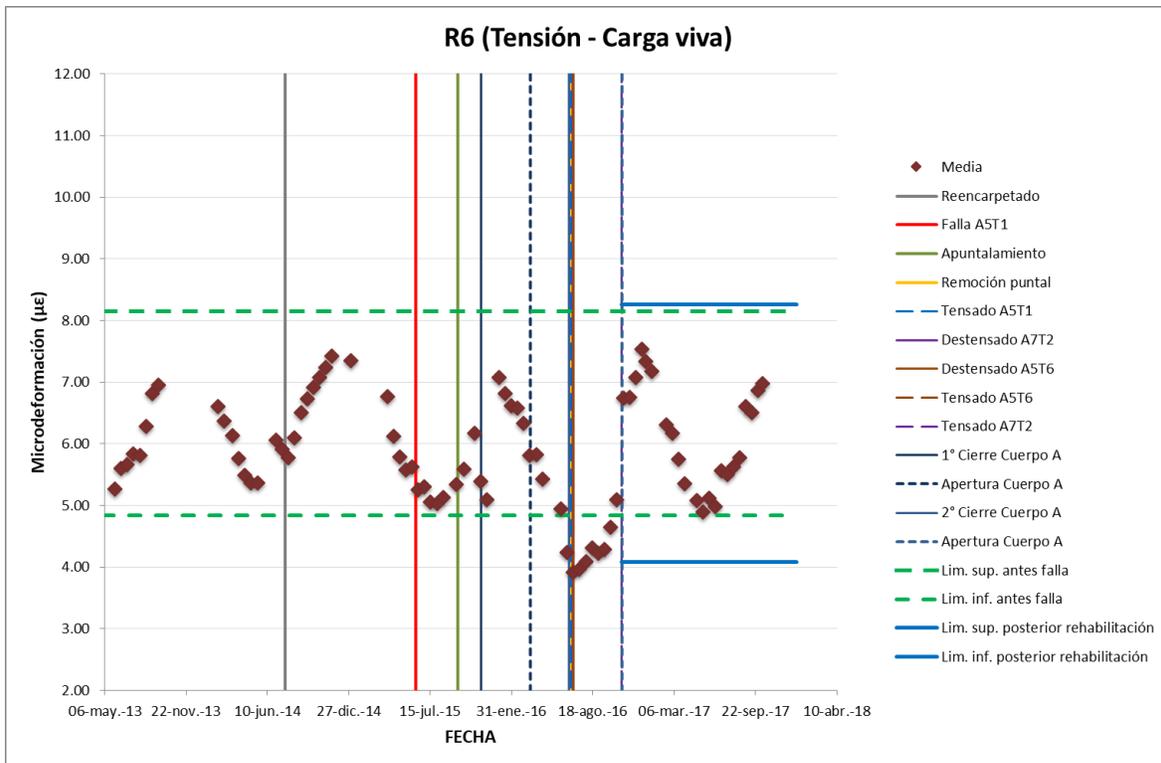


Figura 3.65 Media estadística del extensómetro R6 a tensión

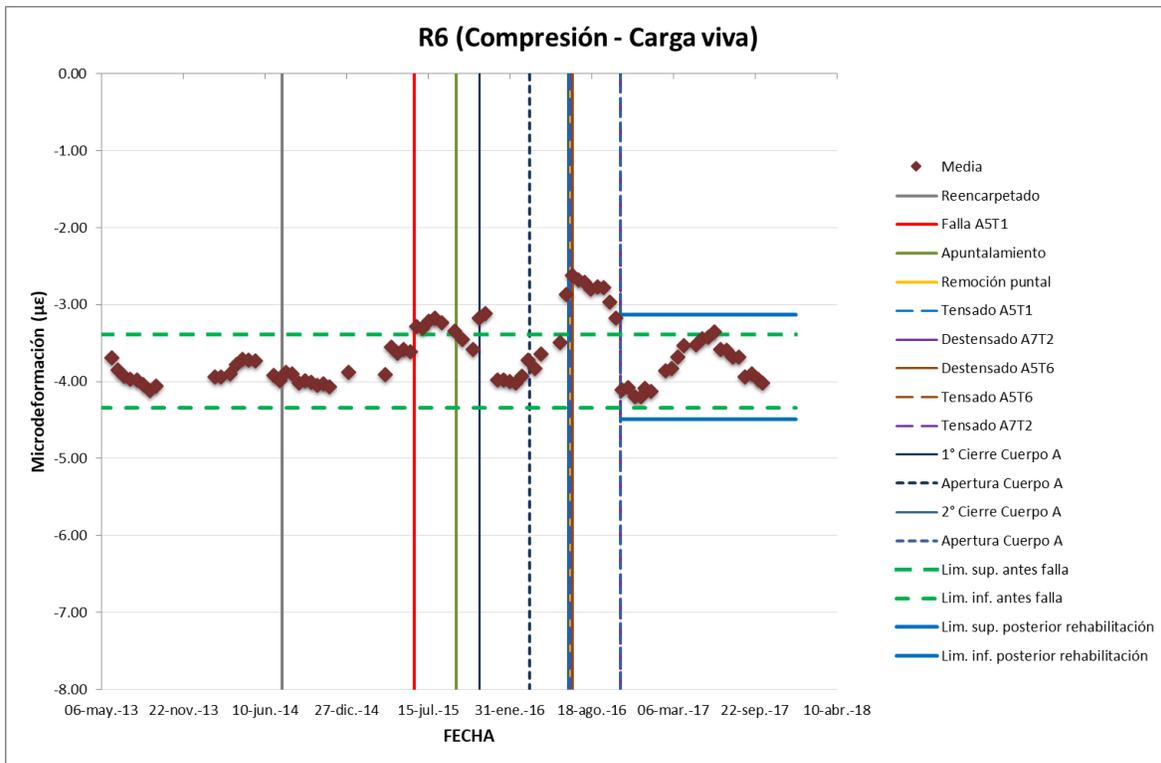


Figura 3.66 Media estadística del extensómetro R6 a compresión

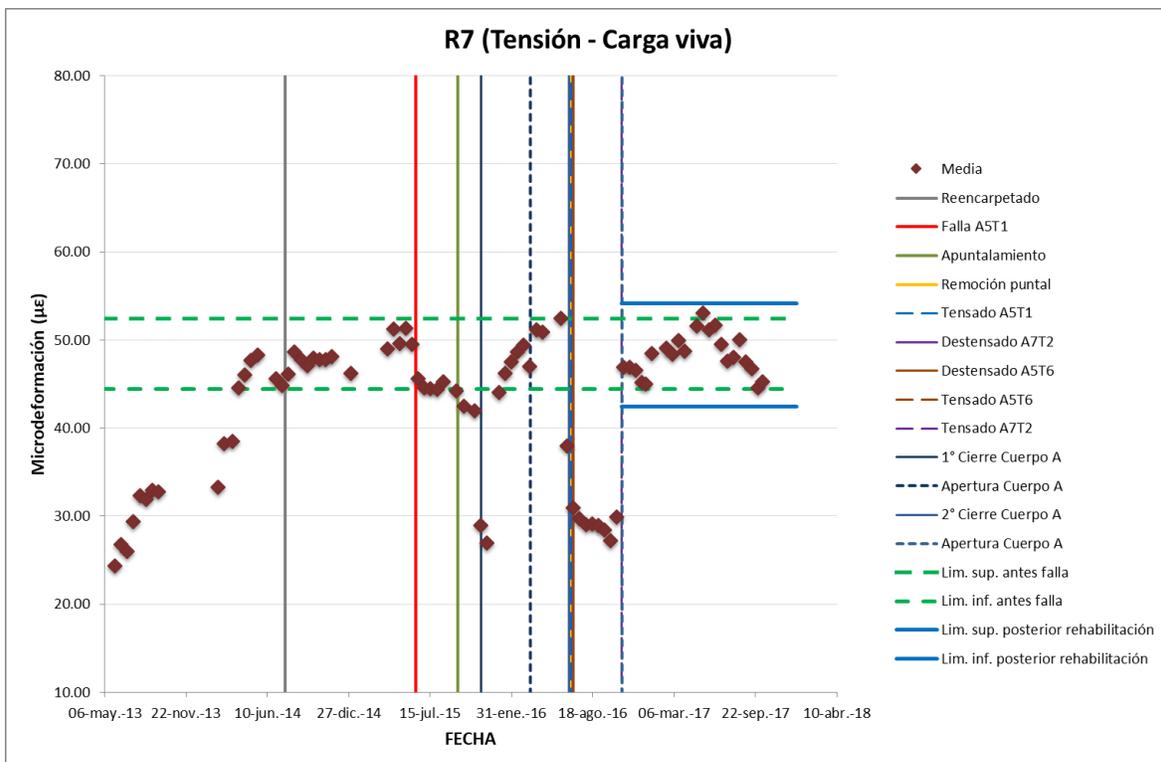


Figura 3.67 Media estadística del extensómetro R7 a tensión

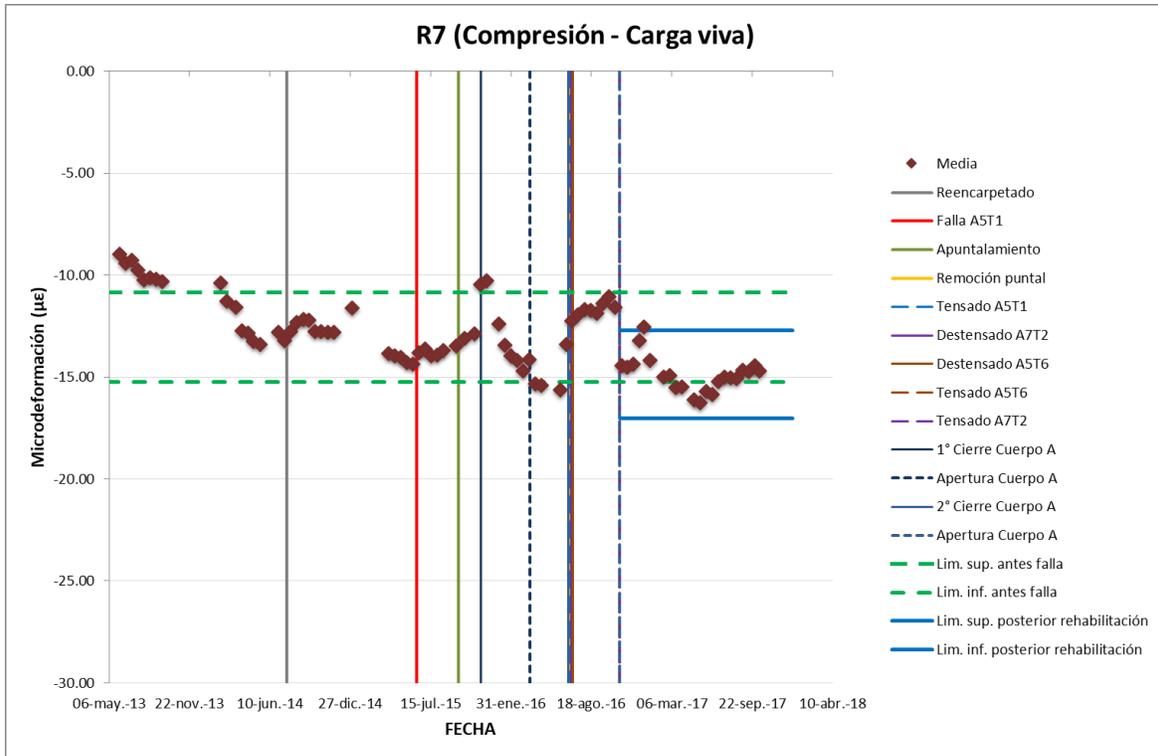


Figura 3.68 Media estadística del extensómetro R7 a compresión

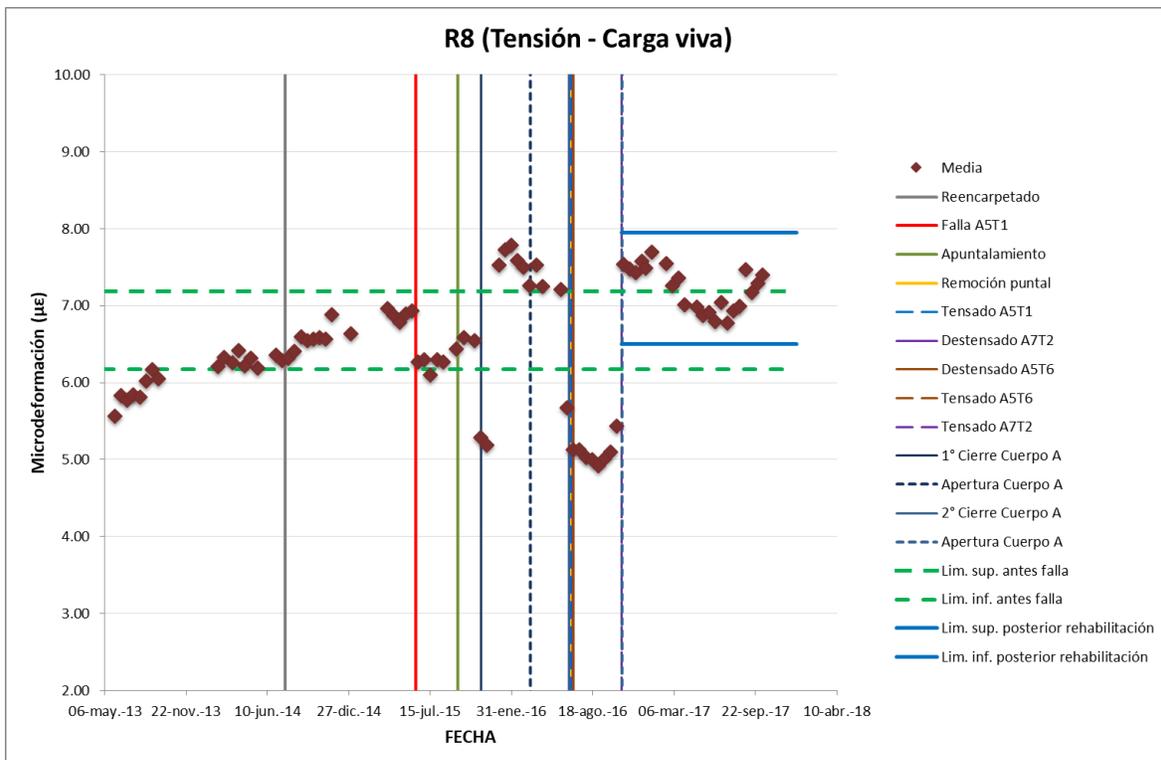


Figura 3.69 Media estadística del extensómetro R8 a tensión

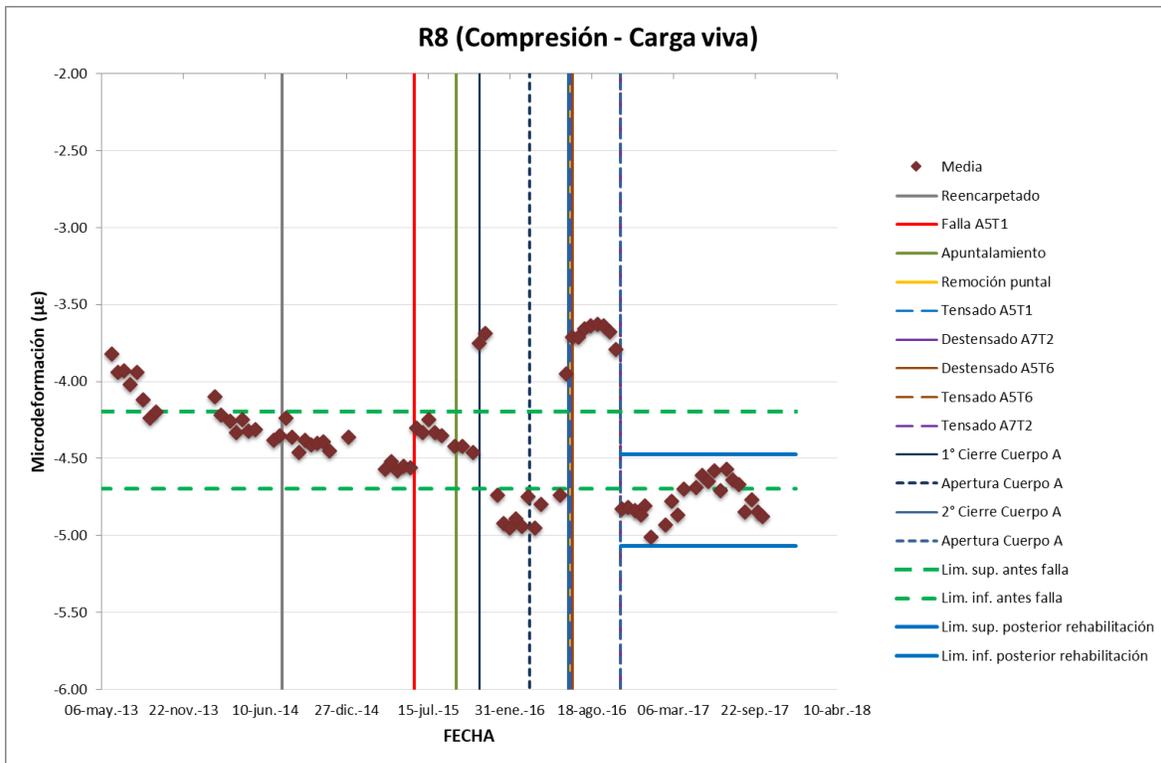


Figura 3.70 Media estadística del extensómetro R8 a compresión

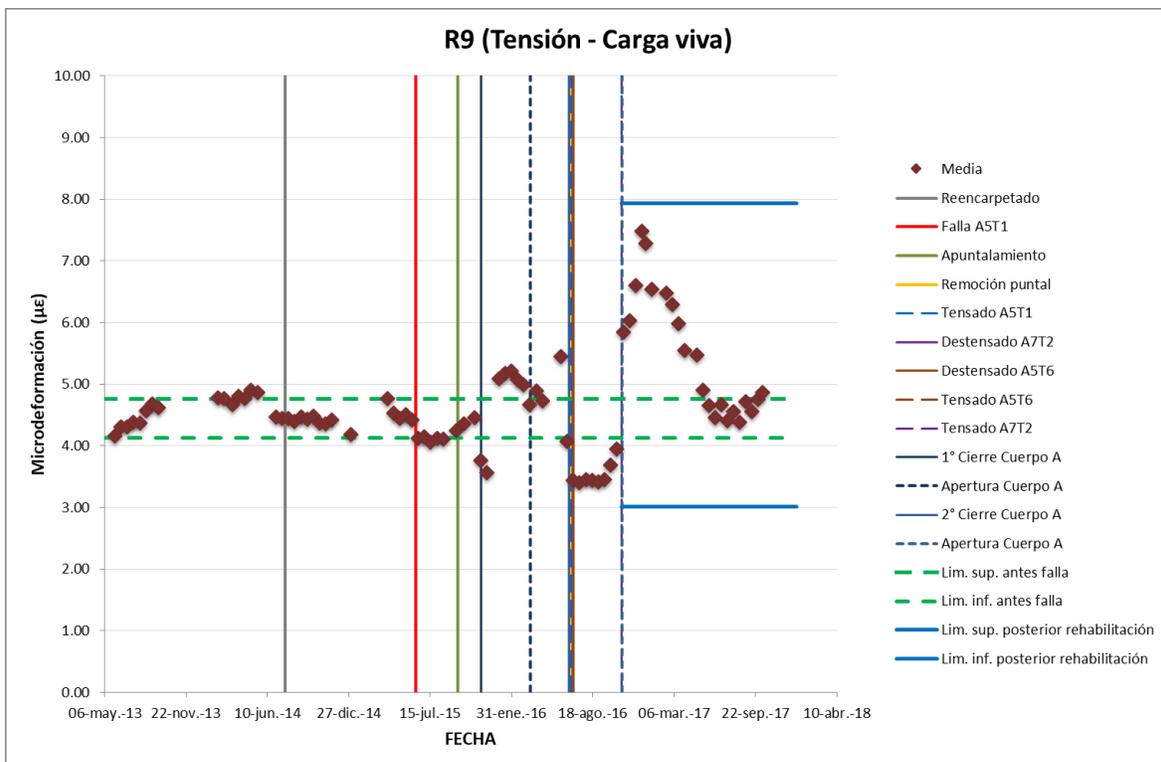


Figura 3.71 Media estadística del extensómetro R9 a tensión

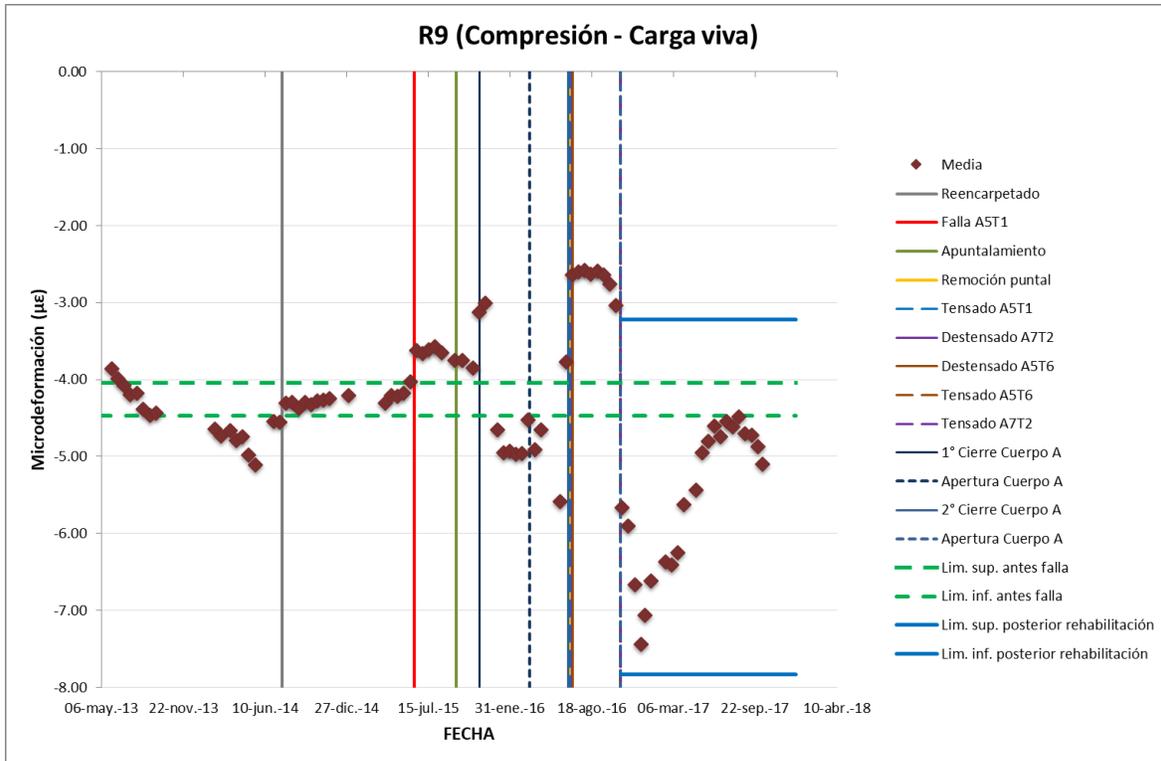


Figura 3.72 Media estadística del extensómetro R9 a compresión

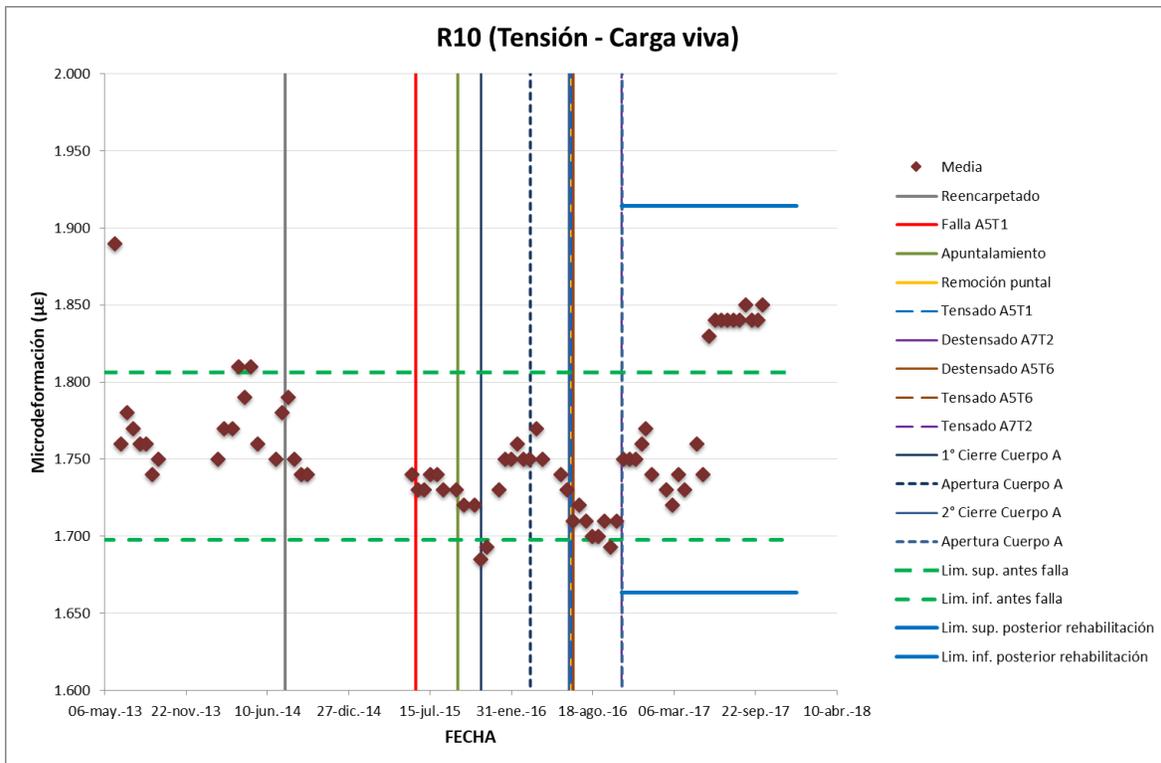


Figura 3.73 Media estadística del extensómetro R10 a tensión

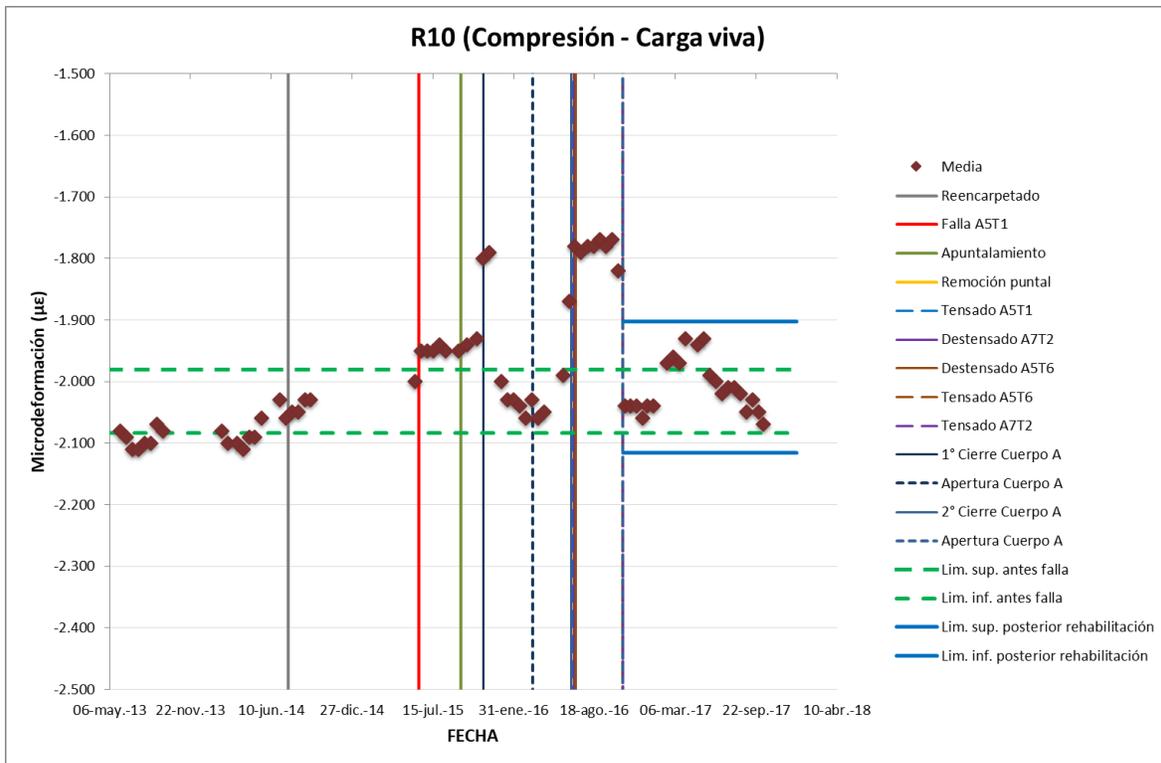


Figura 3.74 Media estadística del extensómetro R10 a compresión

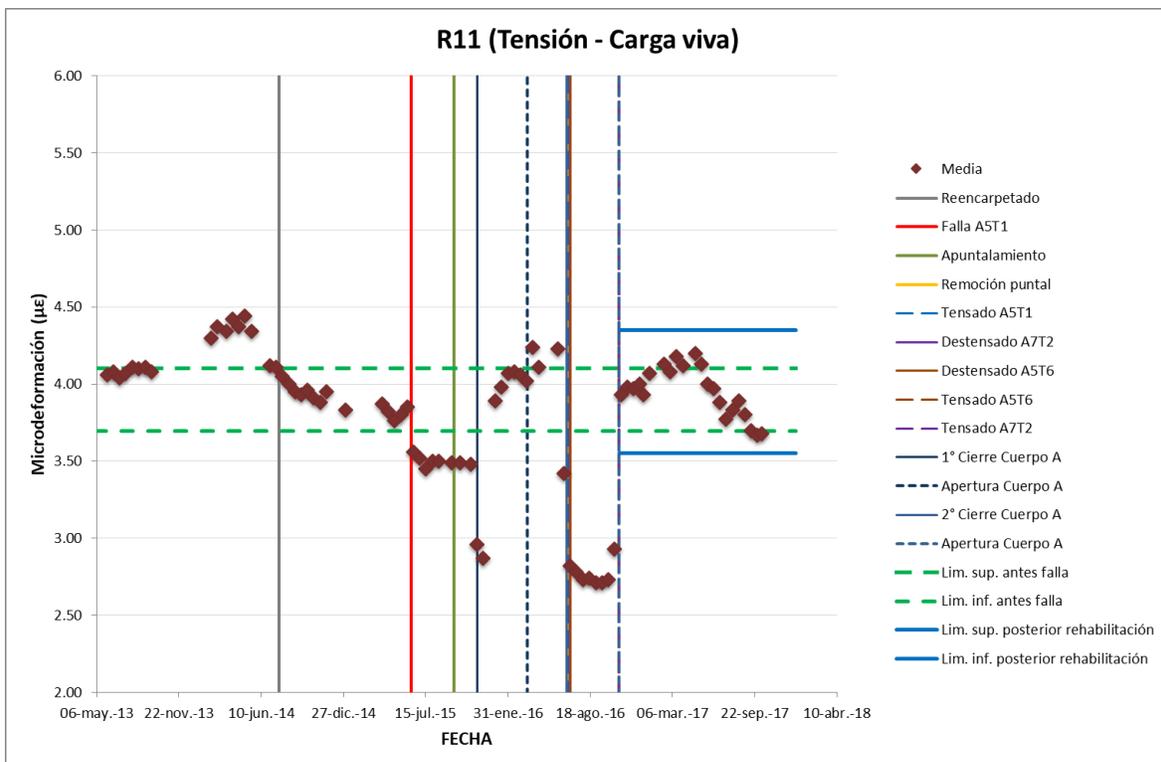


Figura 3.75 Media estadística del extensómetro R11 a tensión

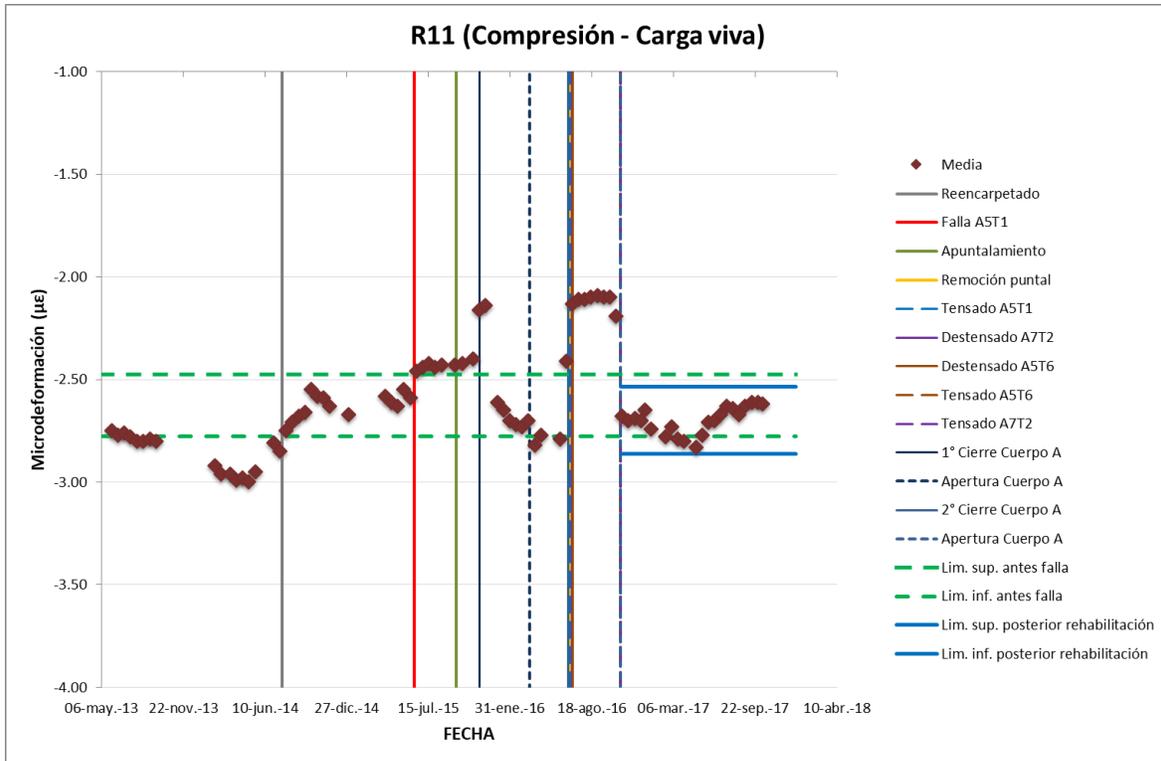


Figura 3.76 Media estadística del extensómetro R11 a compresión

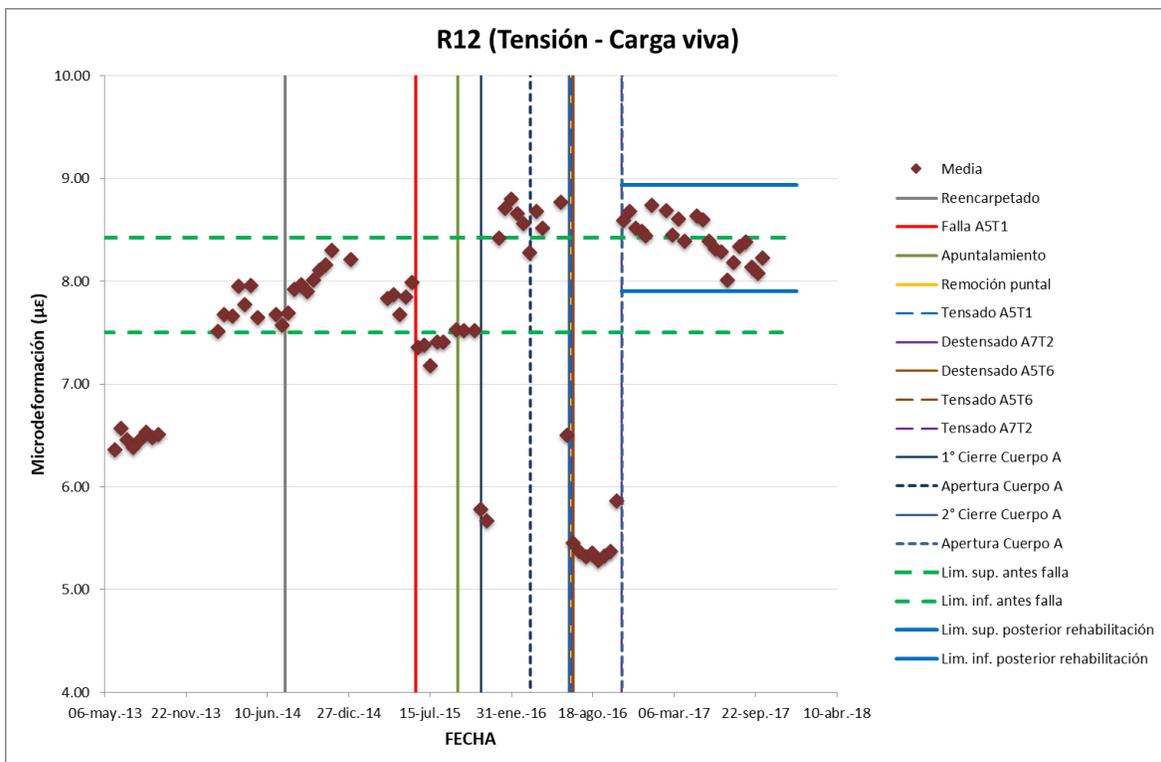


Figura 3.77 Media estadística del extensómetro R12 a tensión

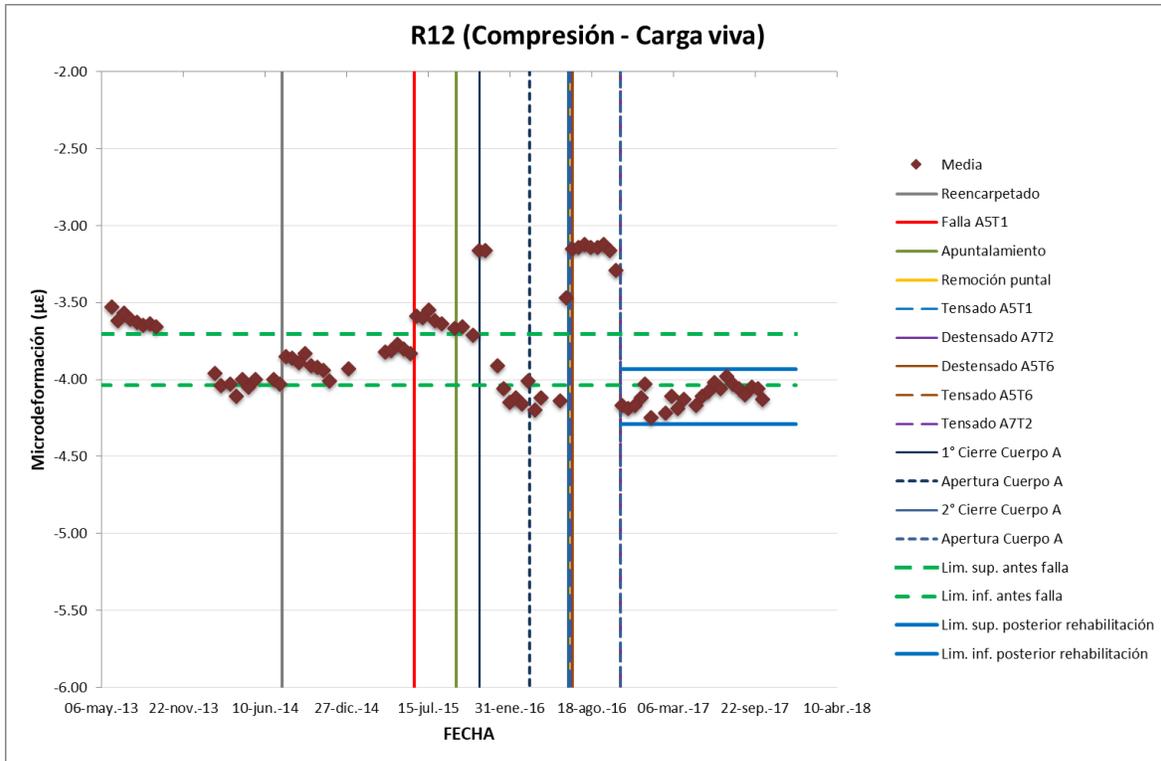


Figura 3.78 Media estadística del extensómetro R12 a compresión

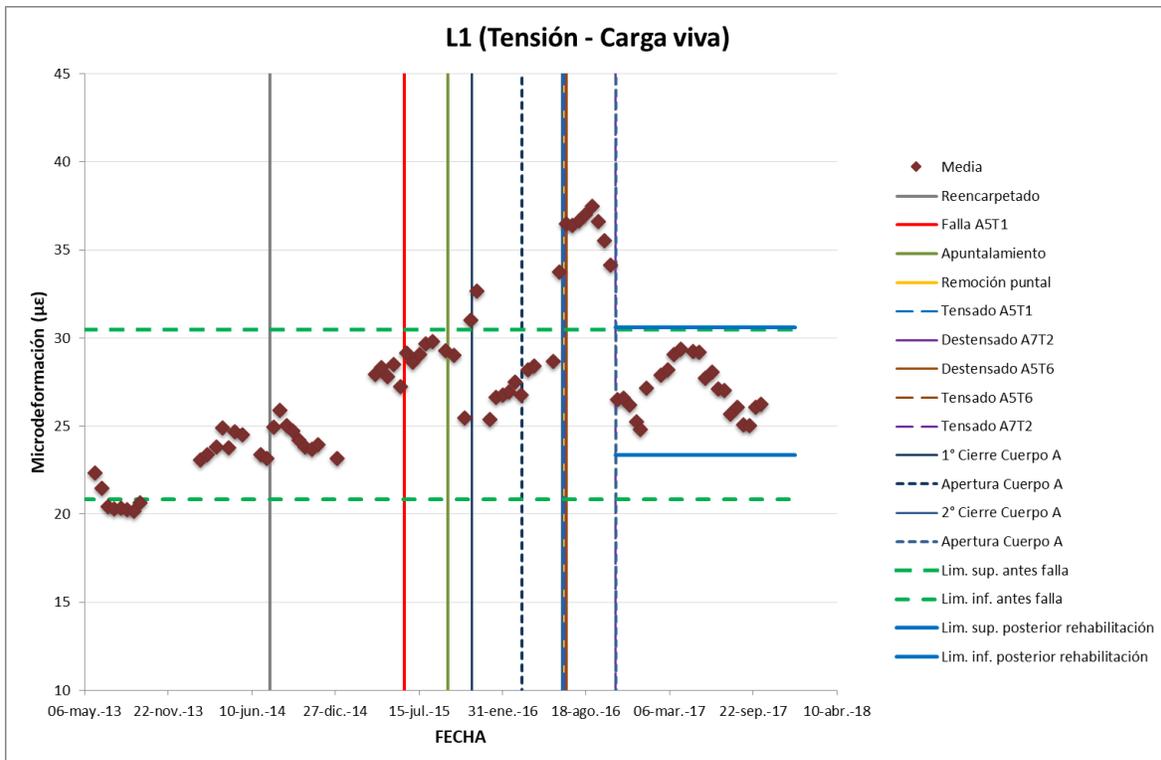


Figura 3.79 Media estadística del extensómetro L1 a tensión

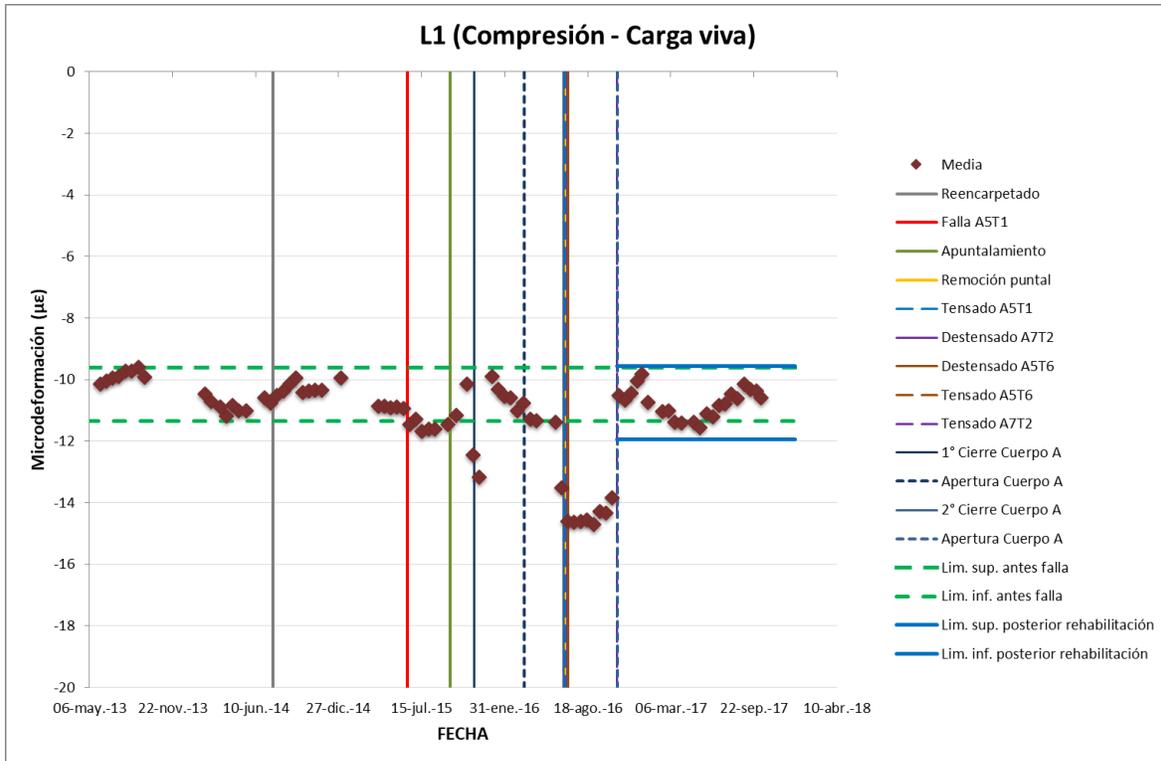


Figura 3.80 Media estadística del extensómetro L1 a compresión

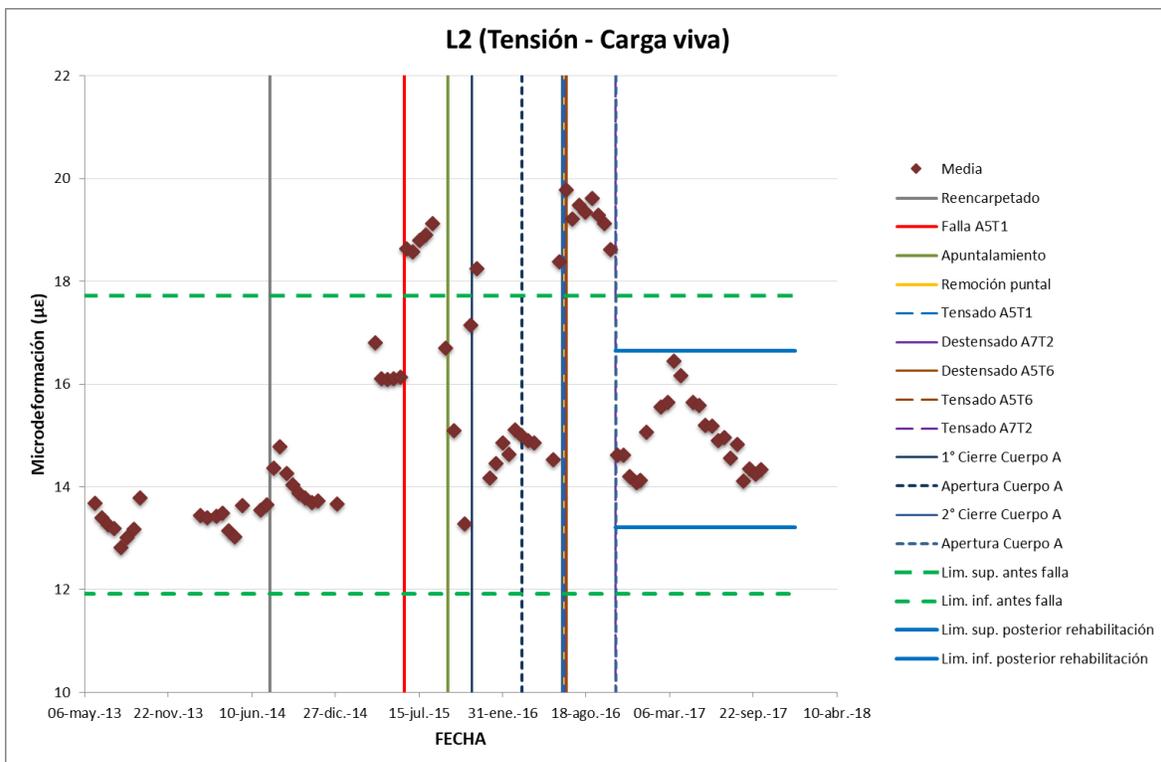


Figura 3.81 Media estadística del extensómetro L2 a tensión

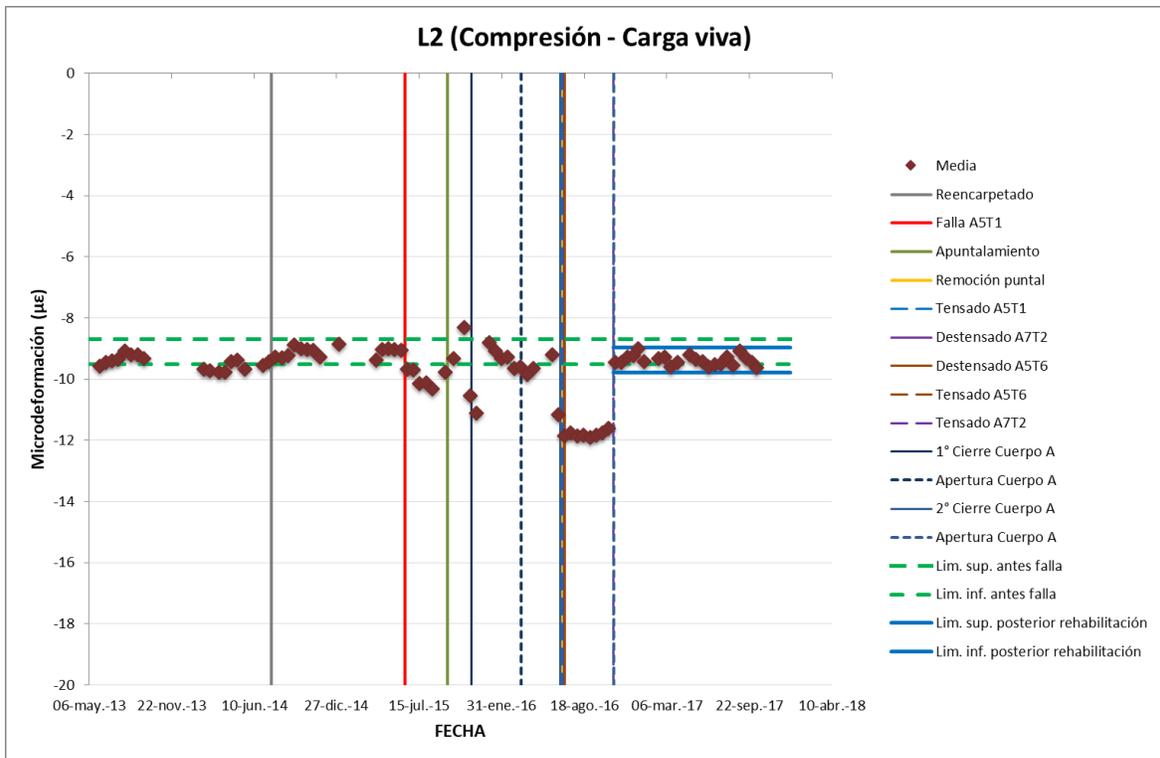


Figura 3.82 Media estadística del extensómetro L2 a compresión

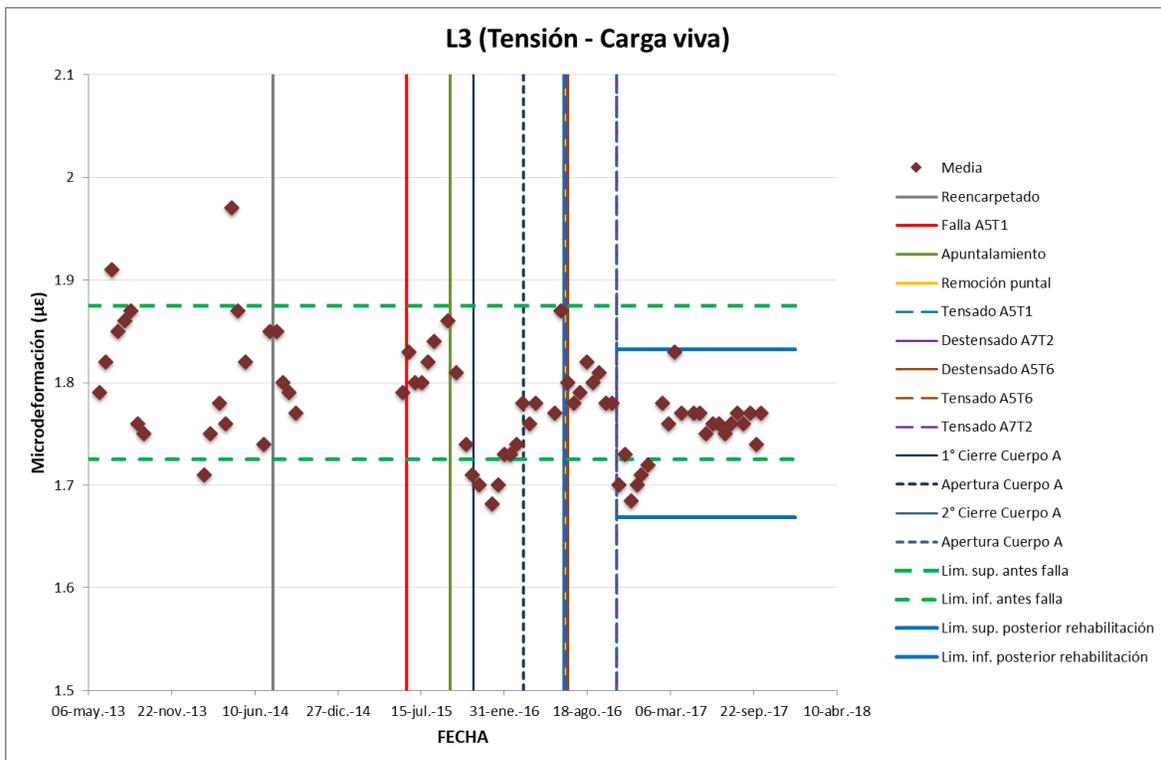


Figura 3.83 Media estadística del extensómetro L3 a tensión

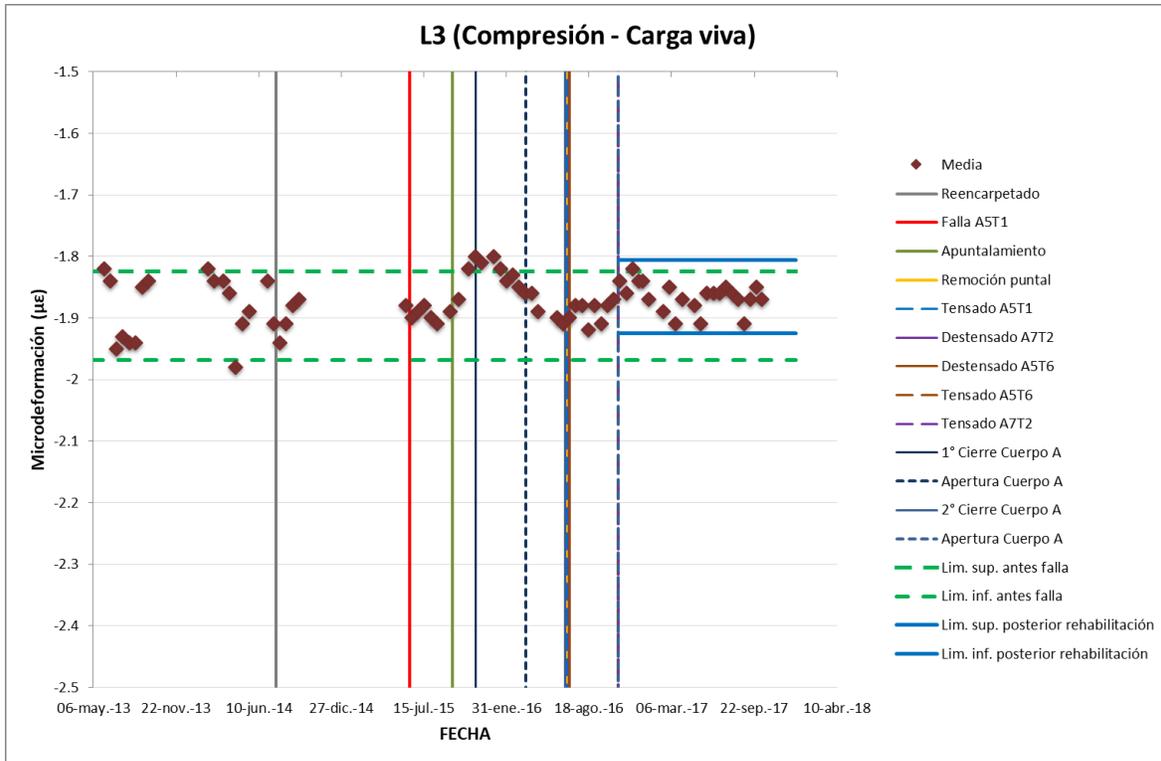


Figura 3.84 Media estadística del extensómetro L3 a compresión

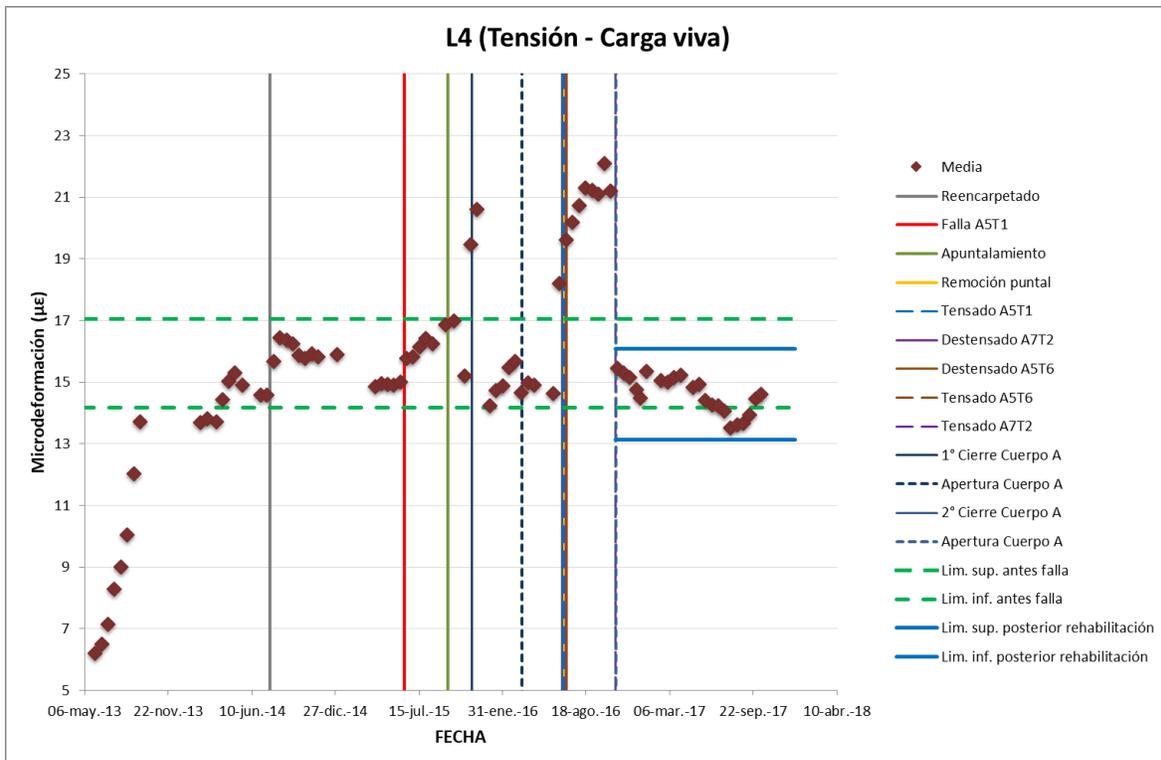


Figura 3.85 Media estadística del extensómetro L4 a tensión

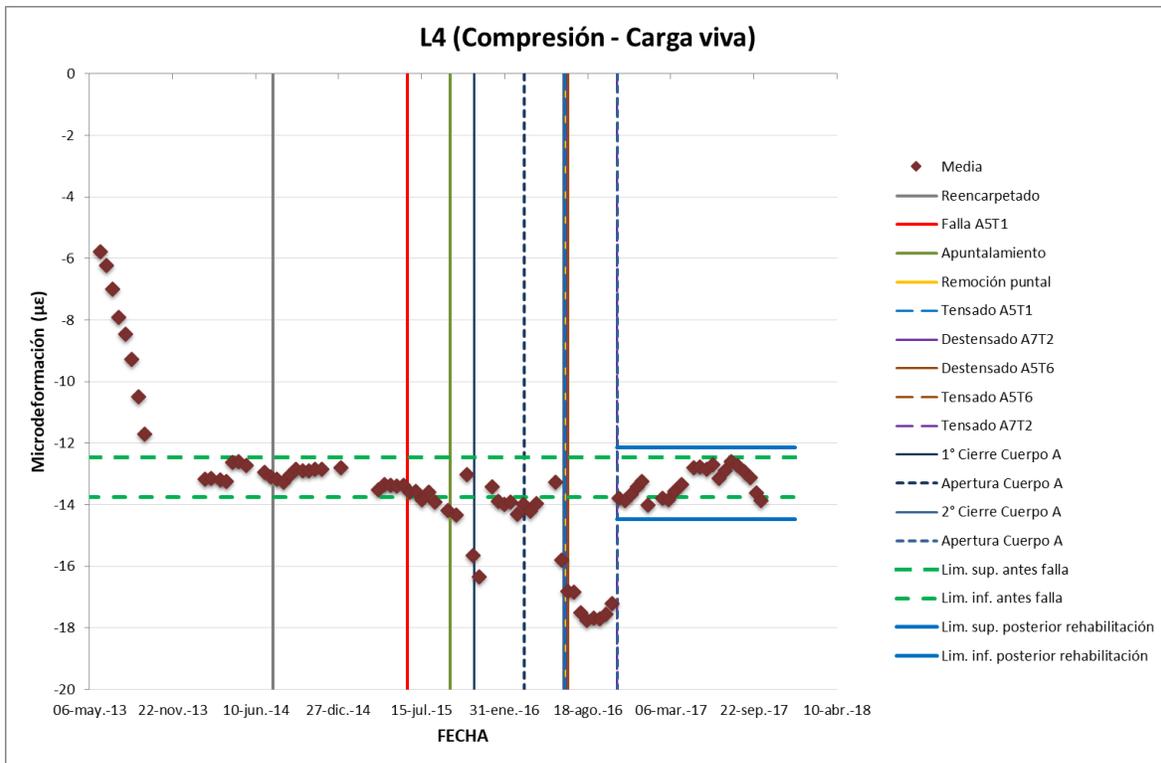


Figura 3.86 Media estadística del extensómetro L4 a compresión

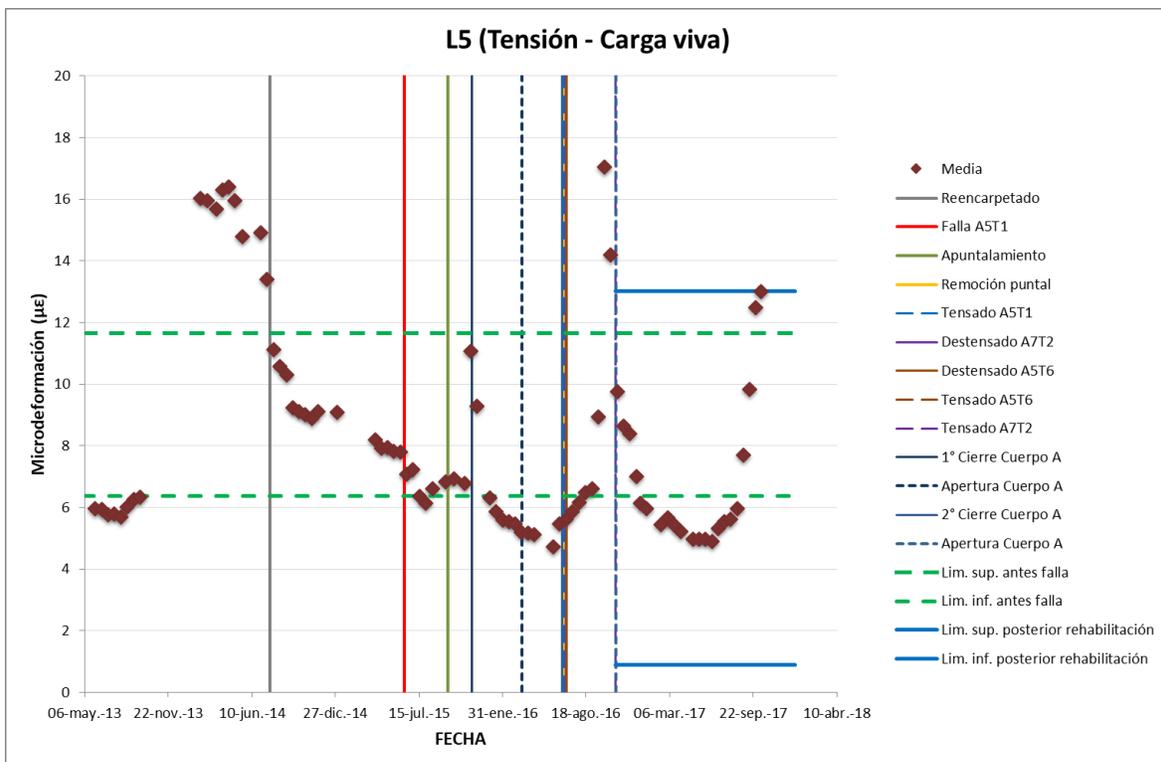


Figura 3.87 Media estadística del extensómetro L5 a tensión

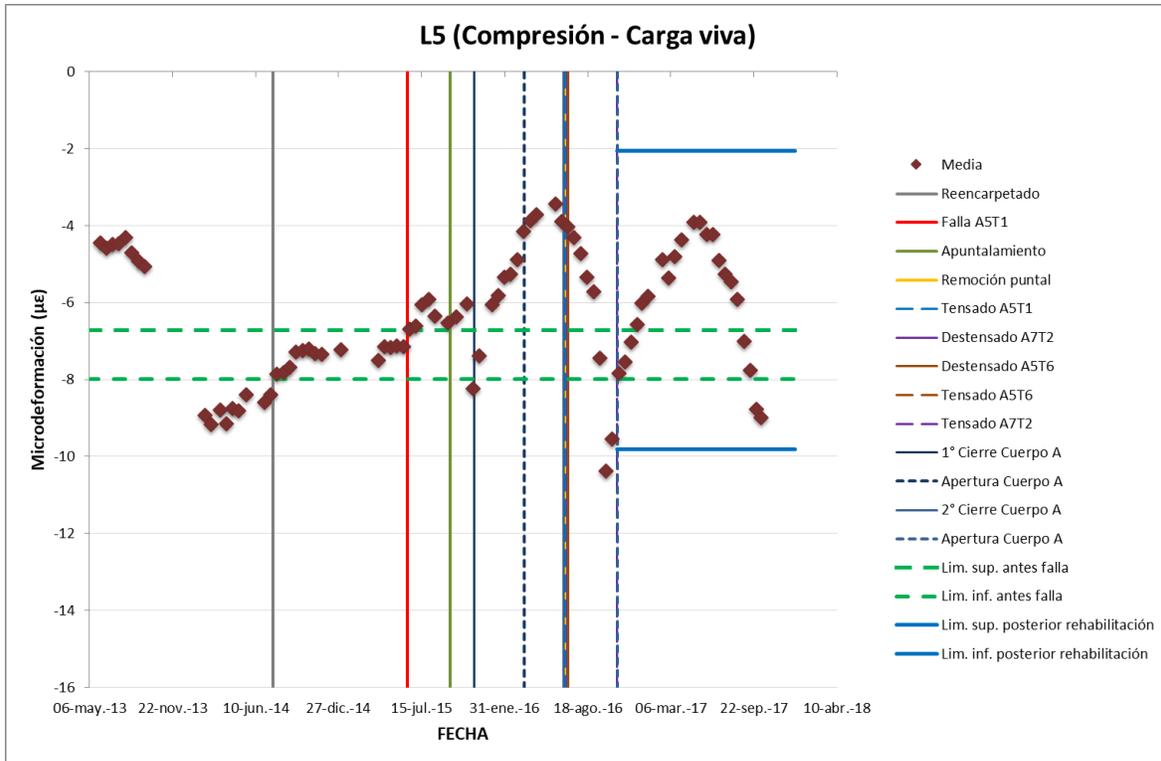


Figura 3.88 Media estadística del extensómetro L5 a compresión

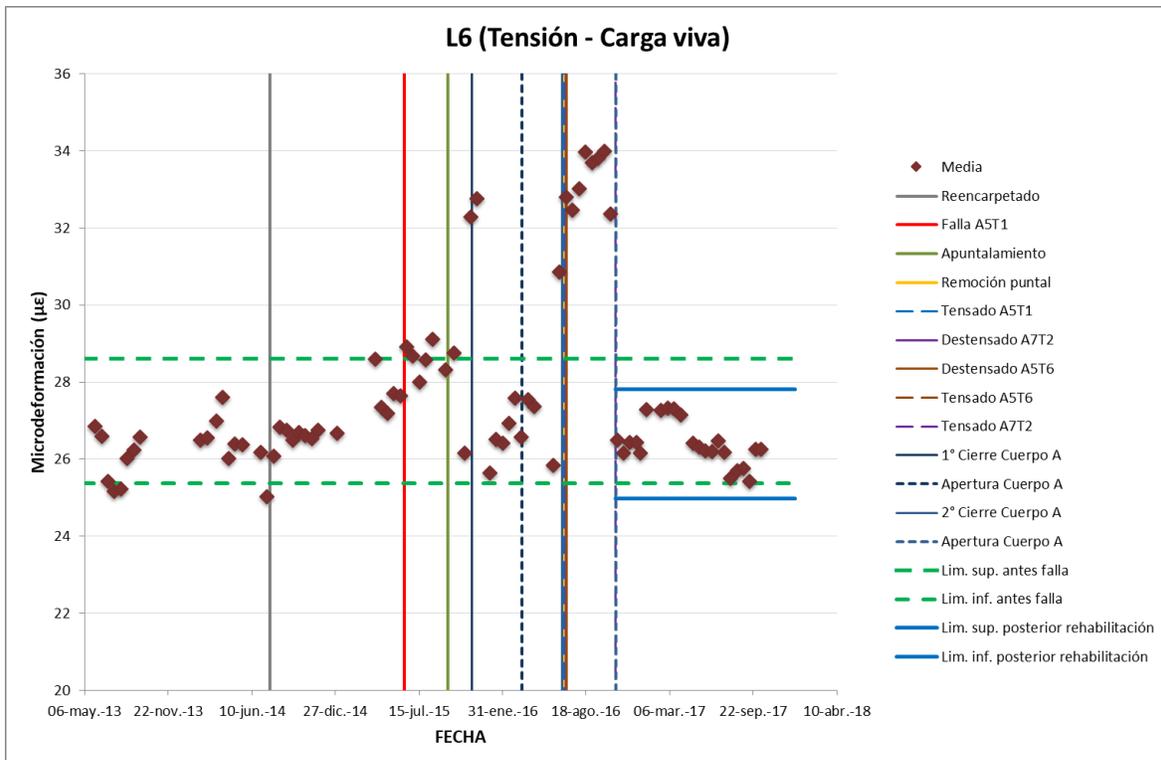


Figura 3.89 Media estadística del extensómetro L6 a tensión

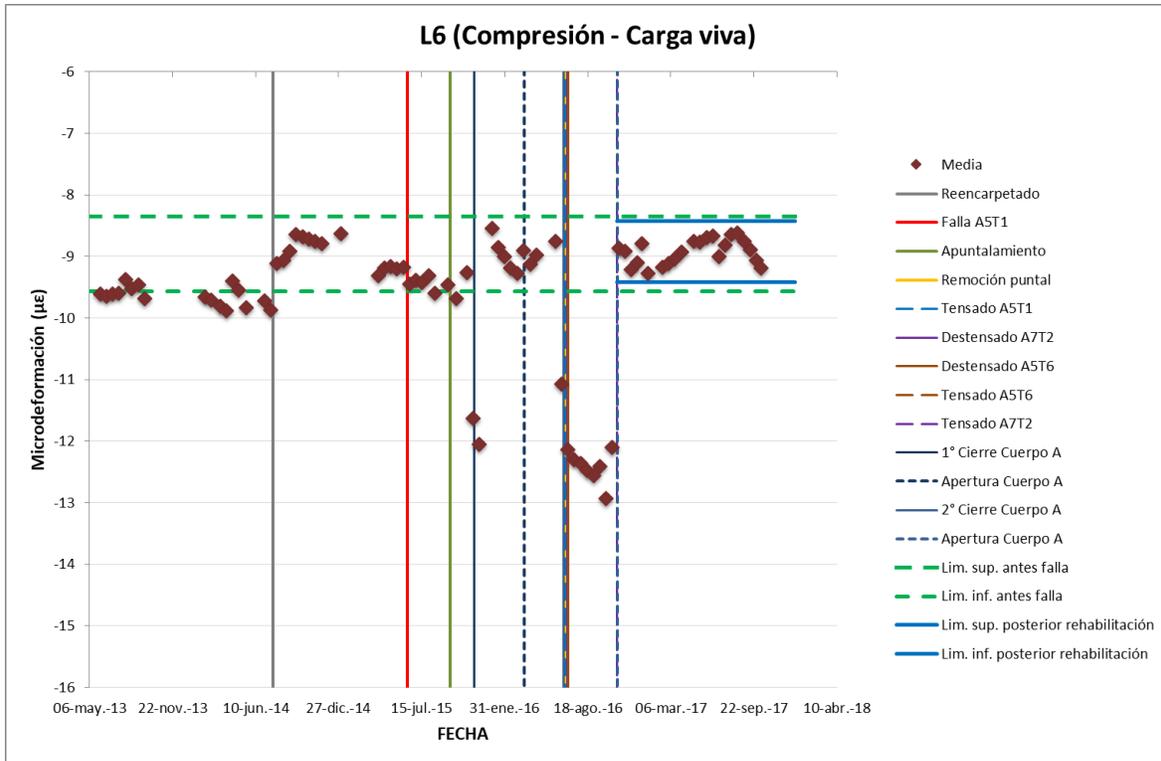


Figura 3.90 Media estadística del extensómetro L6 a compresión

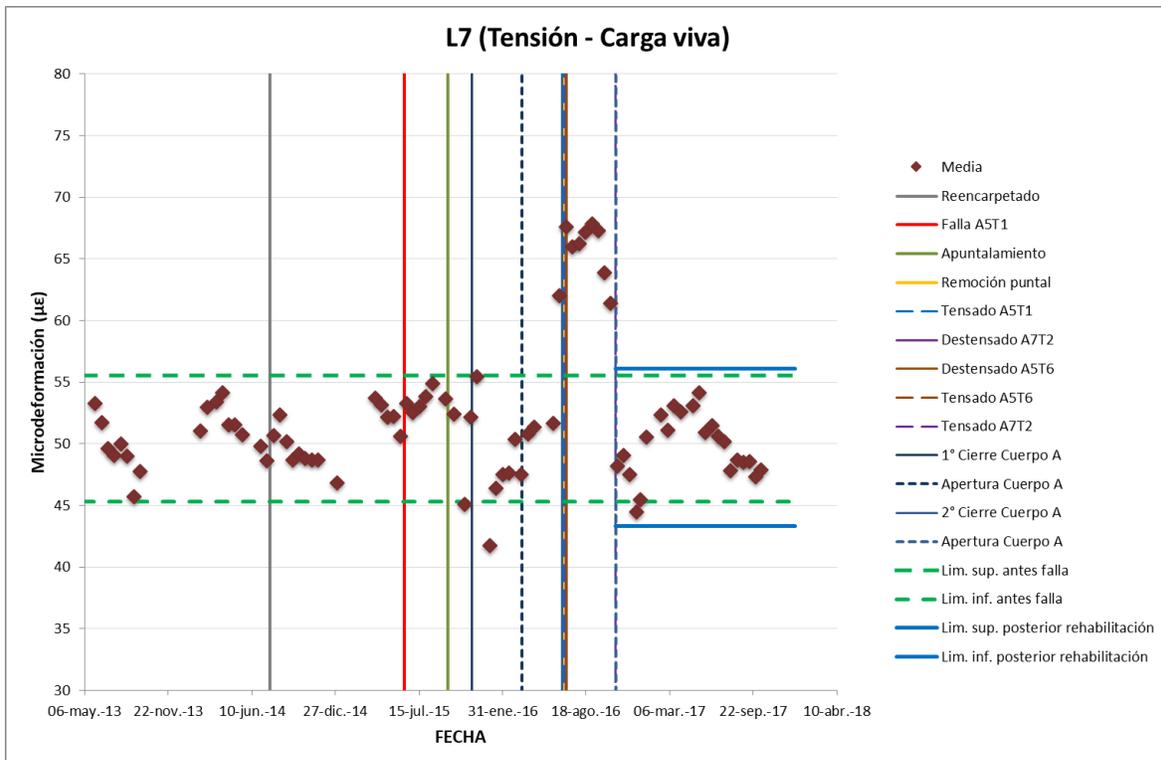


Figura 3.91 Media estadística del extensómetro L7 a tensión

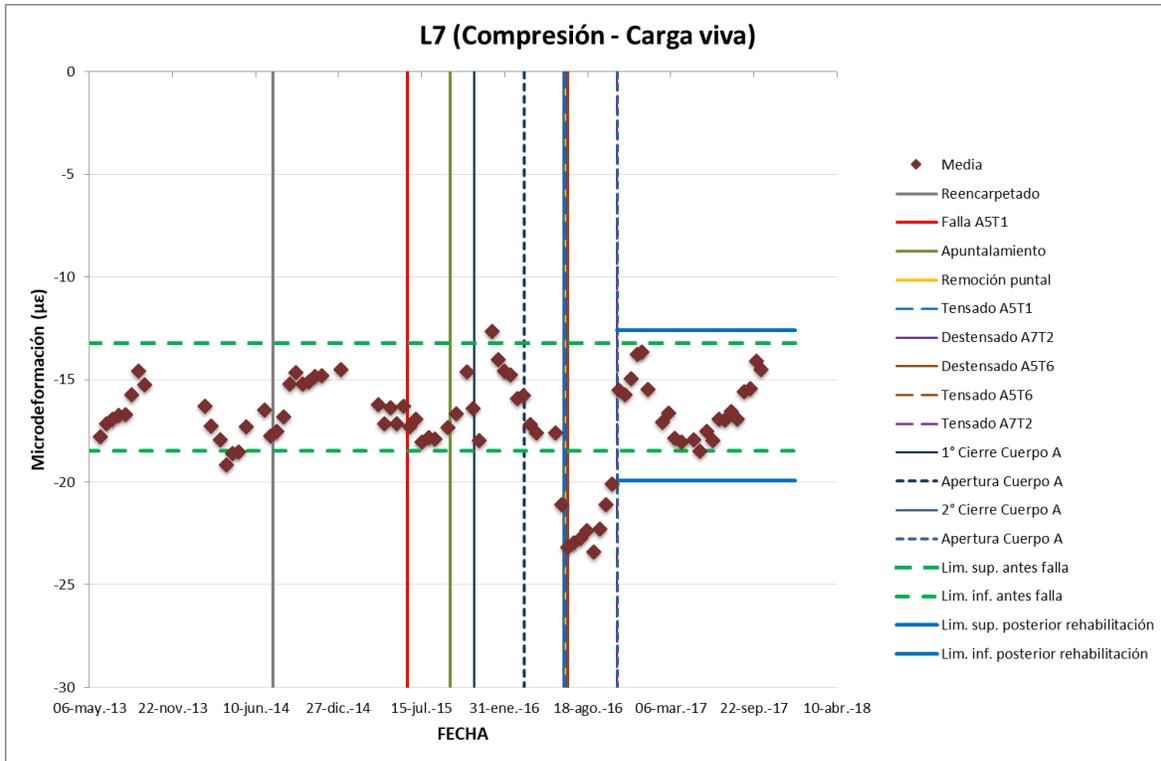


Figura 3.92 Media estadística del extensómetro L7 a compresión

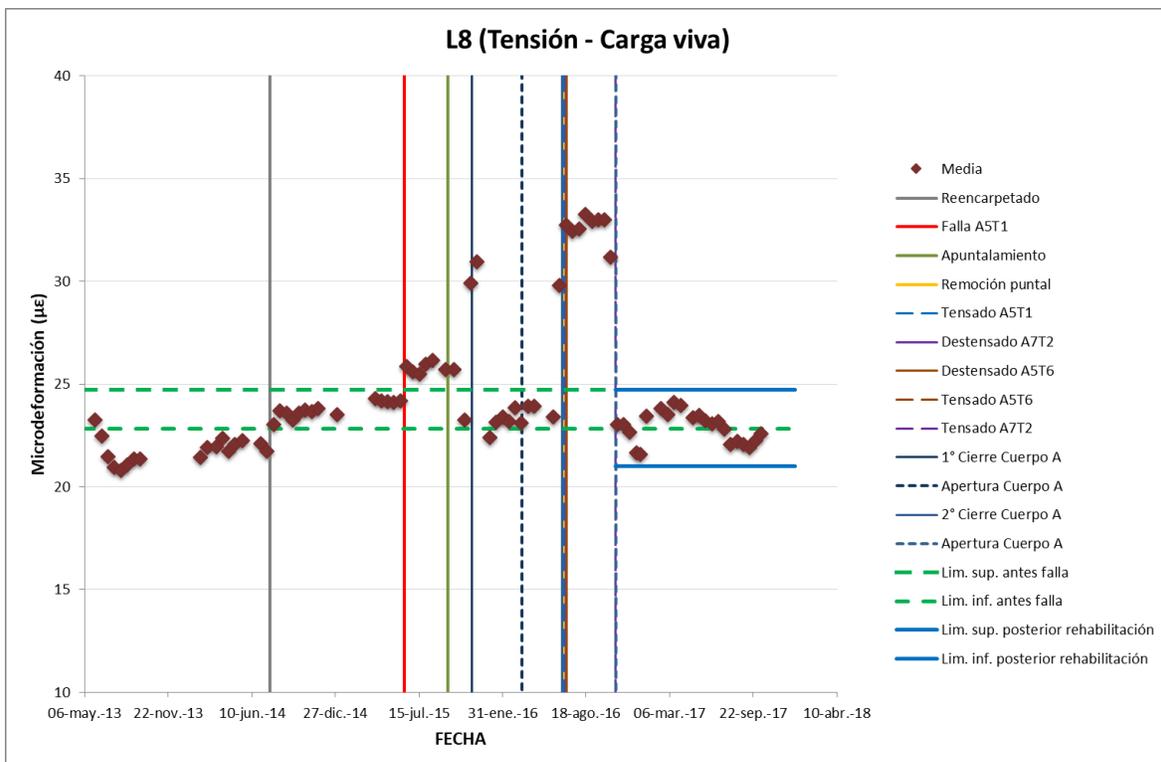


Figura 3.93 Media estadística del extensómetro L8 a tensión

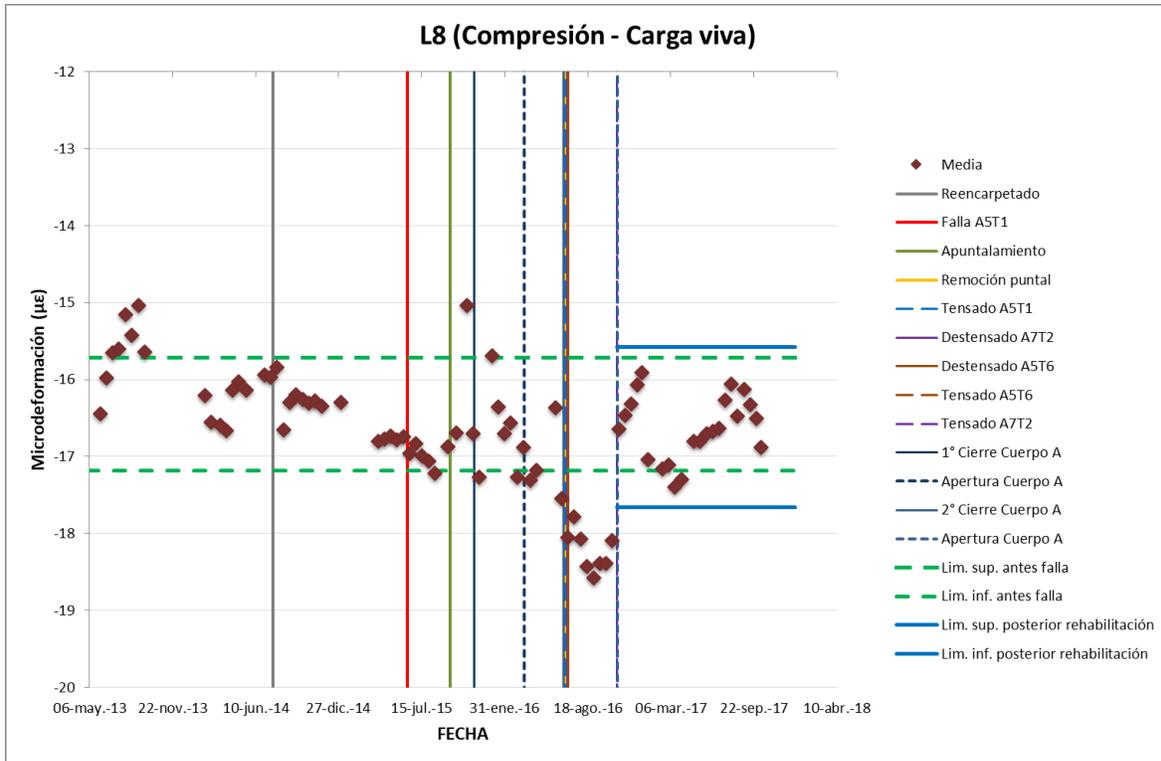


Figura 3.94 Media estadística del extensómetro L8 a compresión

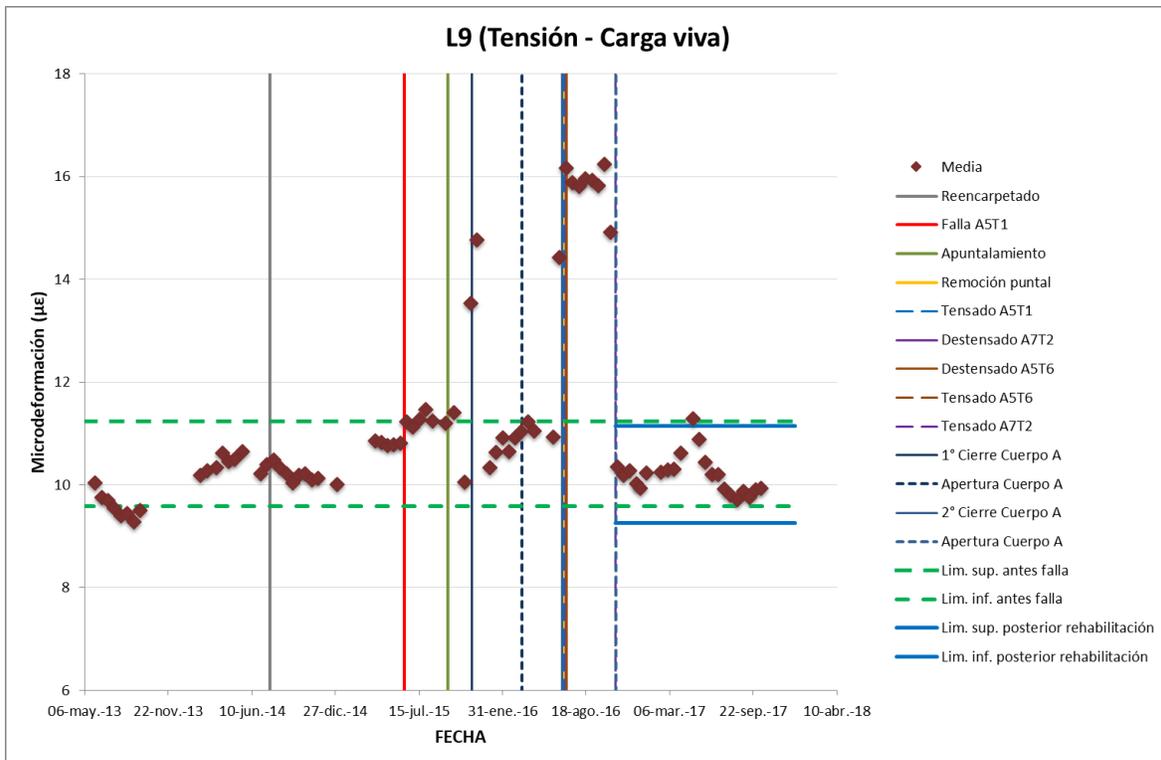


Figura 3.95 Media estadística del extensómetro L9 a tensión

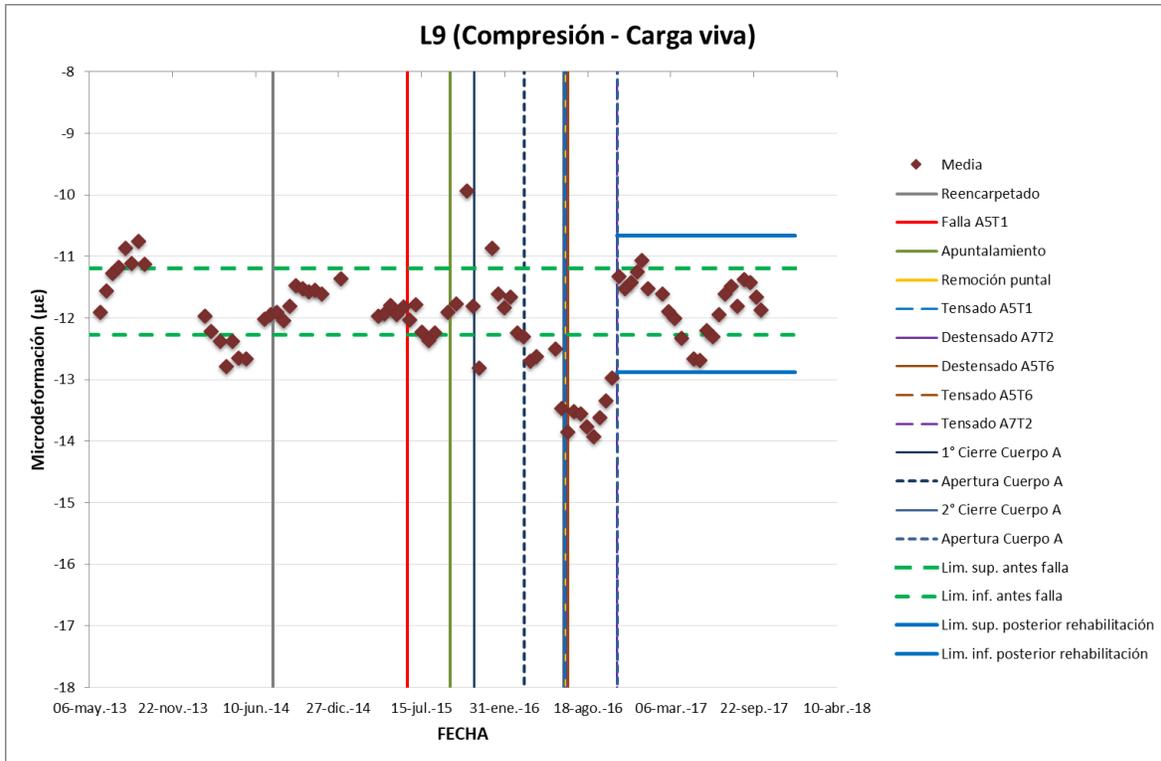


Figura 3.96 Media estadística del extensómetro L9 a compresión

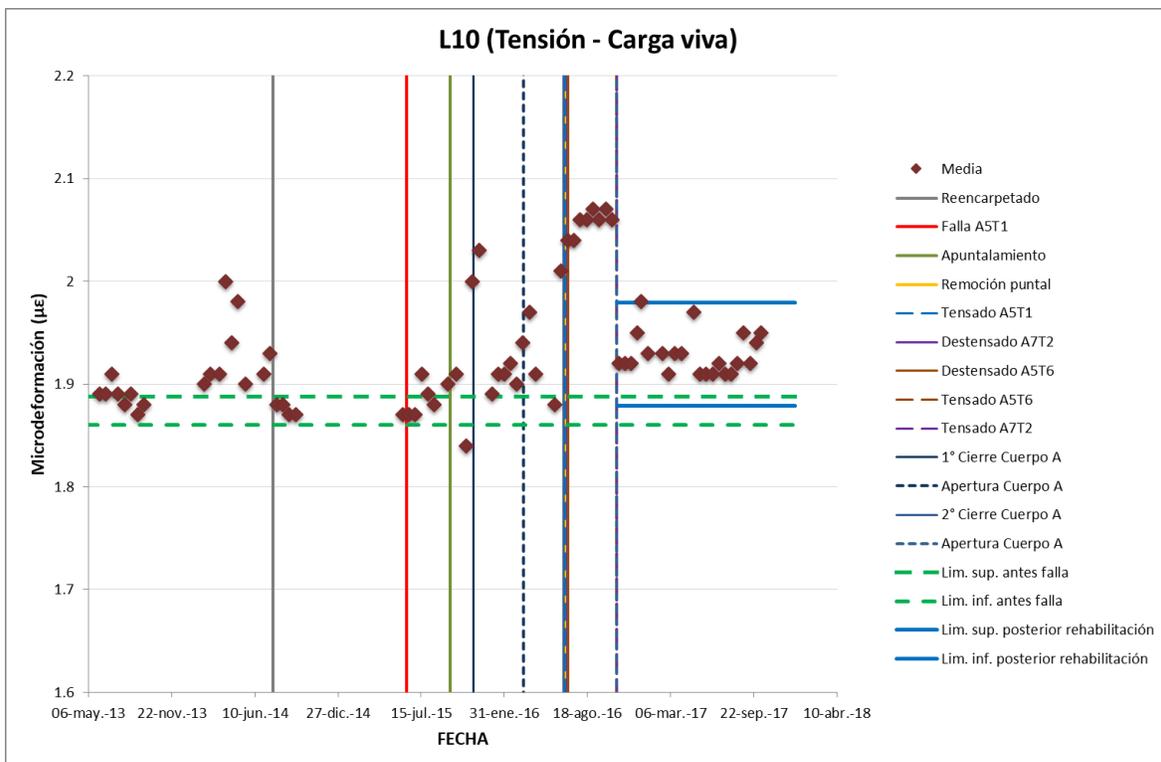


Figura 3.97 Media estadística del extensómetro L10 a tensión

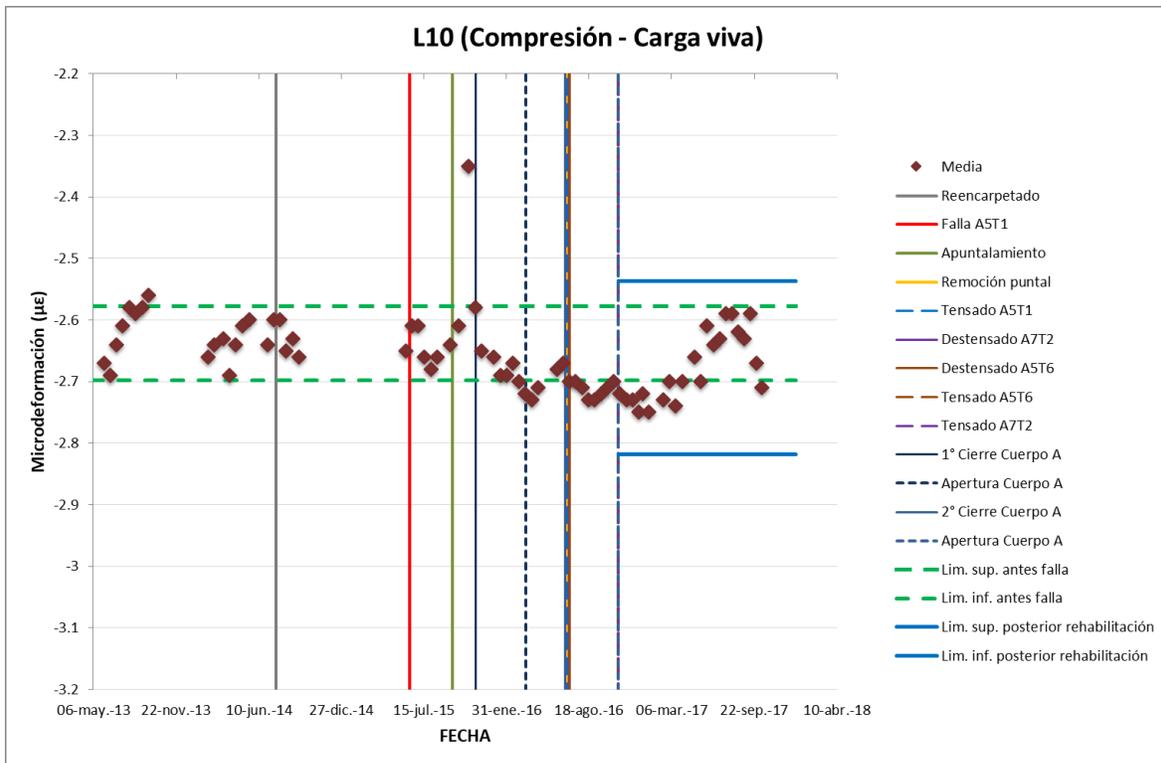


Figura 3.98 Media estadística del extensómetro L10 a compresión

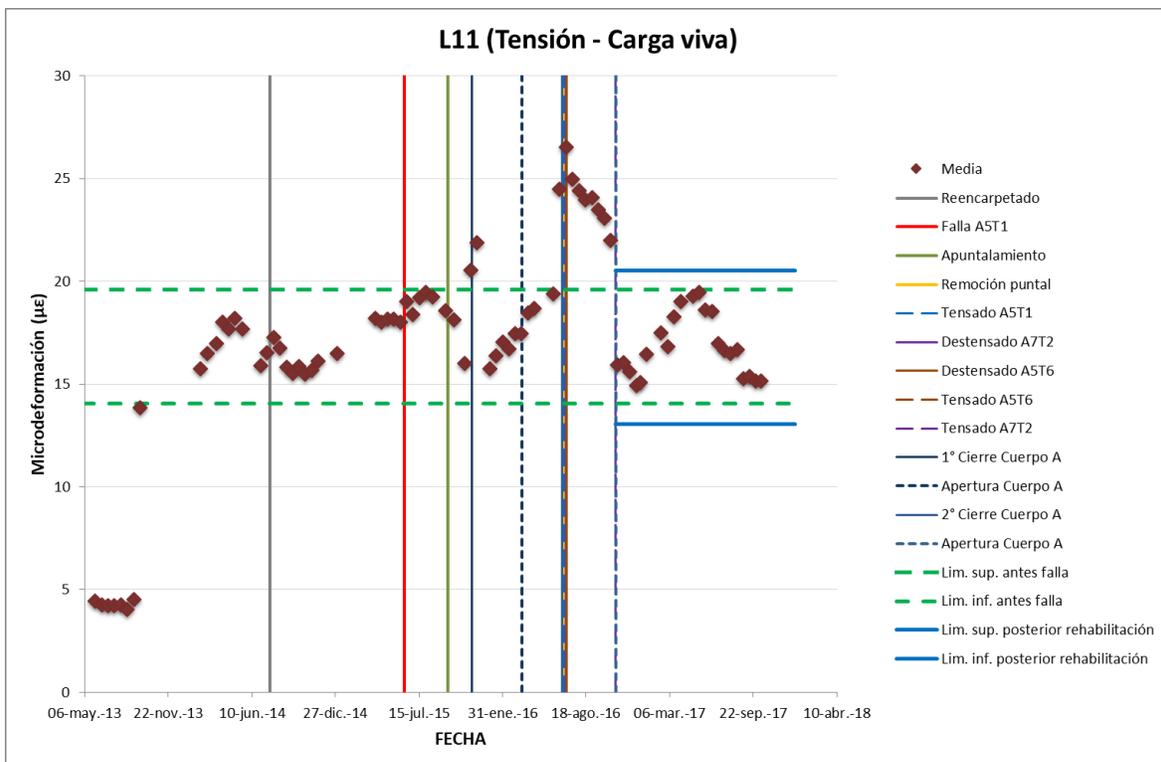


Figura 3.99 Media estadística del extensómetro L11 a tensión

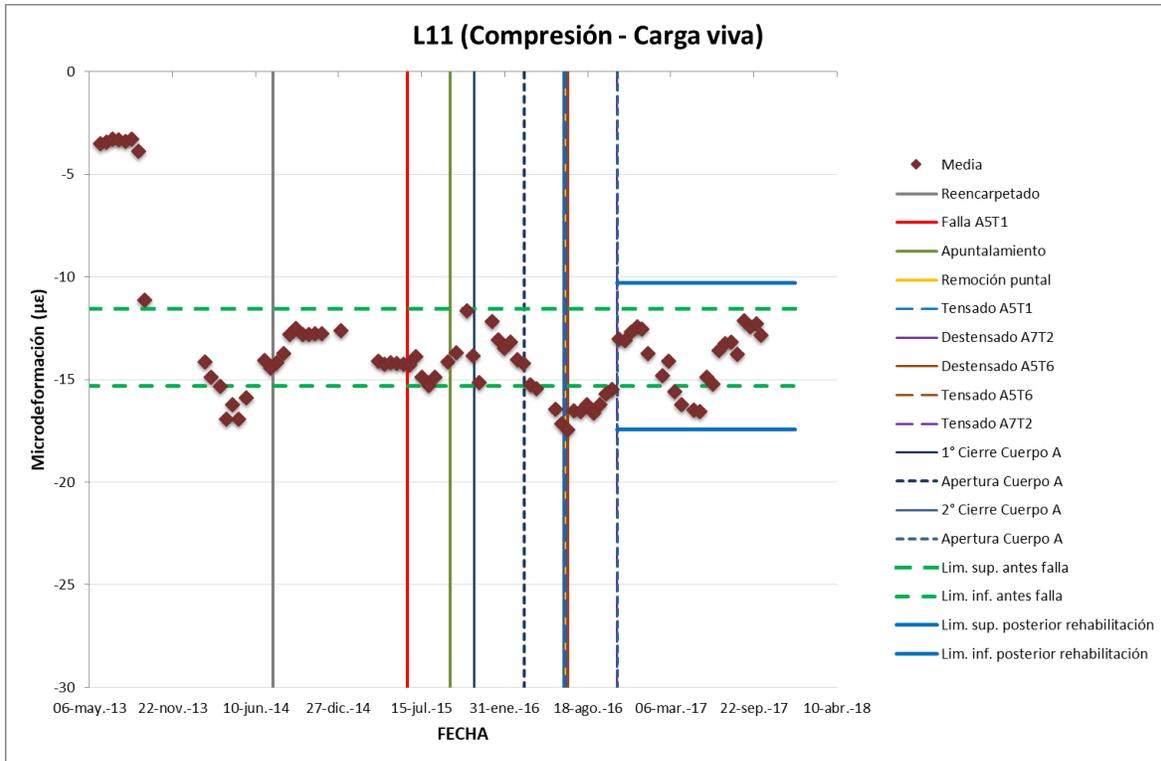


Figura 3.100 Media estadística del extensómetro L11 a compresión

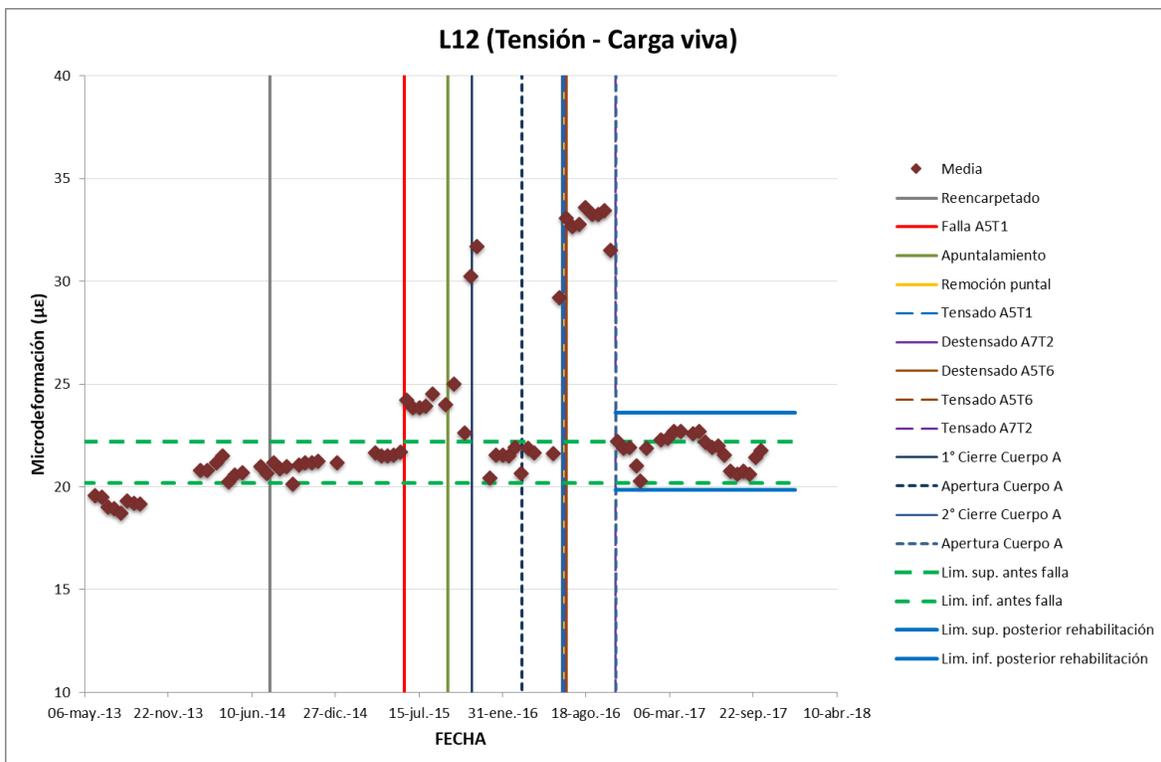


Figura 3.101 Media estadística del extensómetro L12 a tensión

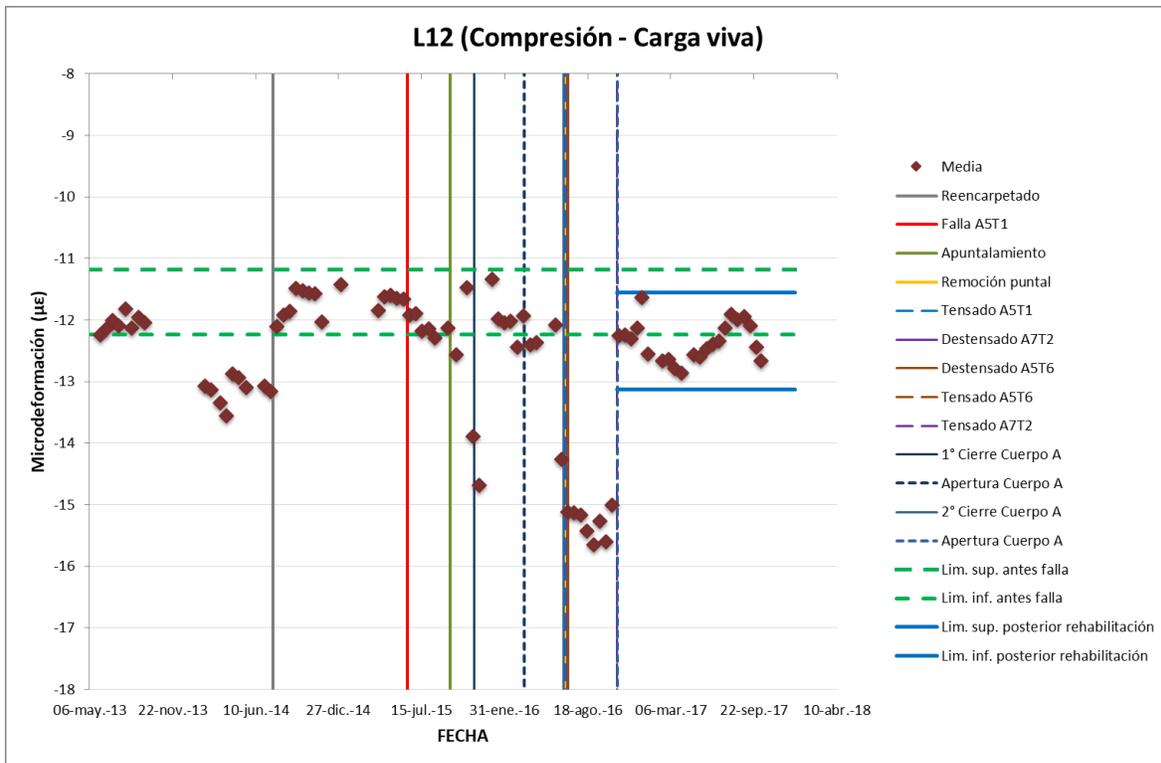


Figura 3.102 Media estadística del extensómetro L12 a compresión

Para obtener las frecuencias naturales del Puente Río Papaloapan 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. De los bloques de datos obtenidos en tiempo real, se identificó un intervalo de tiempo donde el puente se encontraba sin excitaciones por carga viva; es decir, únicamente sujeto a vibraciones ambientales como viento y las provocadas después del paso de un vehículo como las mostradas en la figura 3.103. En la figura 3.104 se puede observar la respuesta dinámica típica de un extensómetro.

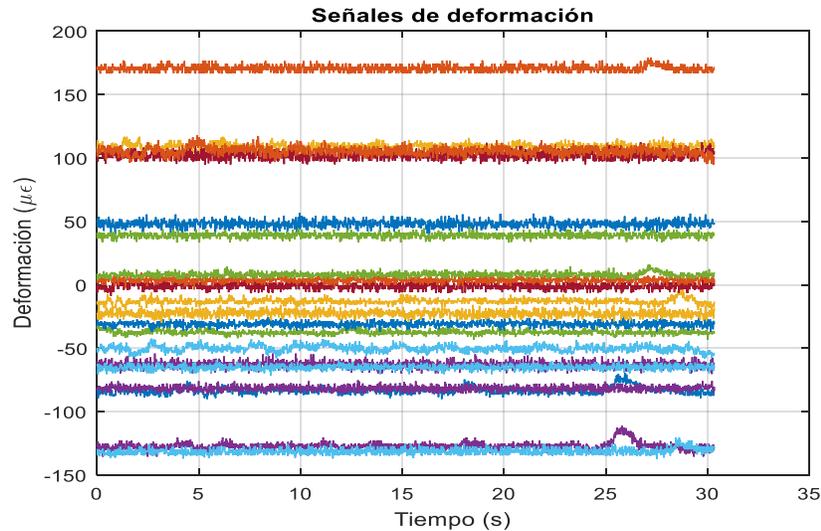


Figura 3.103 Señales dinámicas de deformación producto de vibraciones ambientales

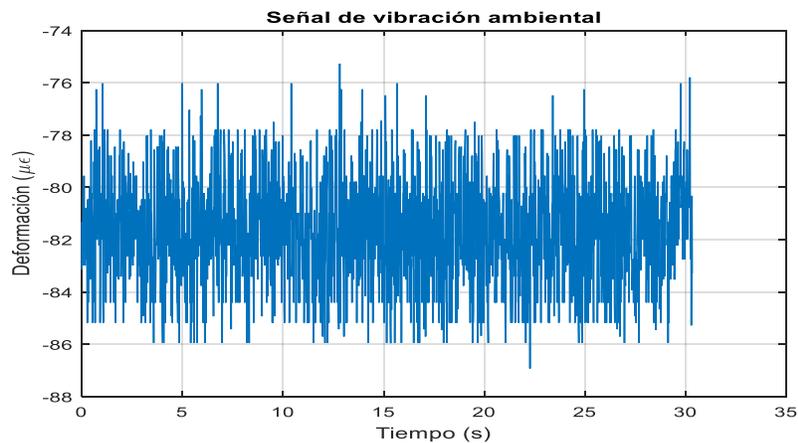


Figura 3.104 Señal dinámica de un extensómetro producto de vibración ambiental

Las respuestas dinámicas fueron transformadas del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia a través de la Transformada de Fourier (FFT) [9], para identificar las frecuencias y el ángulo de fase; adicionalmente se utilizó también la transformada MUSIC [10], que es un algoritmo de alta resolución para señales con altos niveles de ruido en la señal dinámica; las figuras 3.105 y 3.106 muestran la transformada de Fourier y la transformada MUSIC, respectivamente.

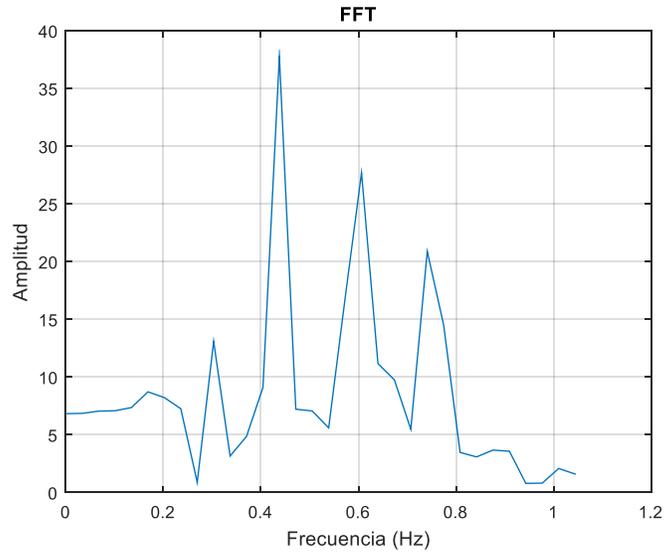


Figura 3.105 Espectro de Fourier para la señal de deformación.

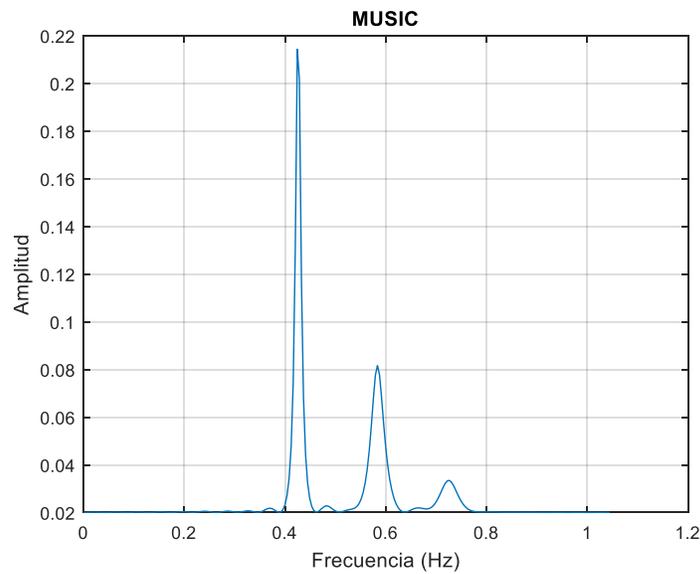


Figura 3.106 Espectro de MUSIC para la señal de deformación.

De los espectros, se identificaron tres frecuencias naturales en un rango de 0-1 Hz; al obtener la amplitud y la fase de cada frecuencia para cada uno de los extensómetros y normalizarla con respecto al sensor de referencia L6, se obtuvieron las formas modales de deformación de los tres primeros modos de vibrar del puente Río Papaloapan (figuras 3.107, 3.108 y 3.109), que fueron comparadas a través del Criterio de Aseguramiento Modal (MAC) con las formas modales de un modelo de elemento finito.

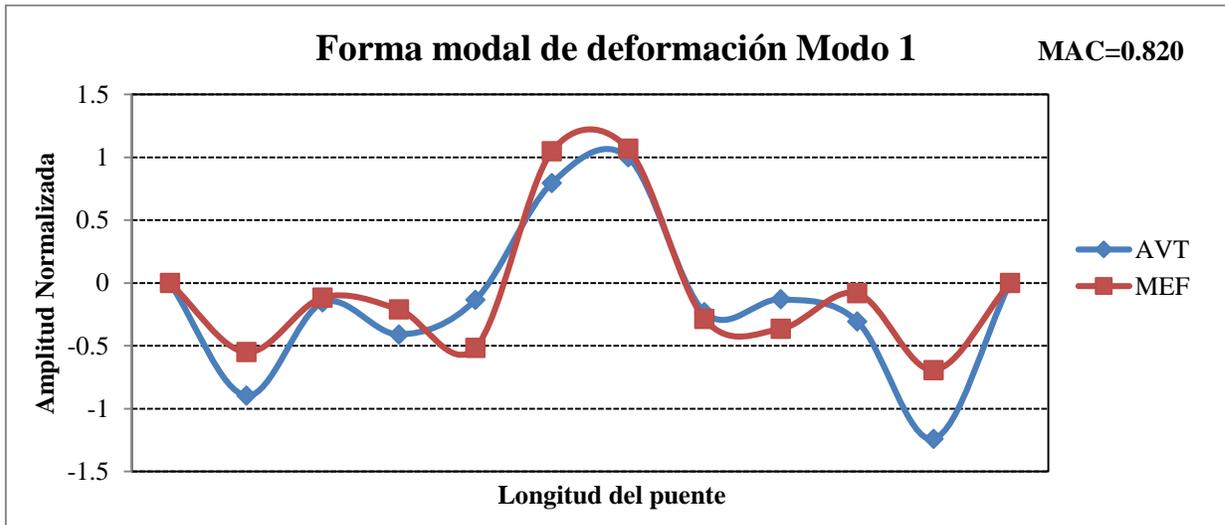


Figura 3.107 Forma modal del primer modo de vibración

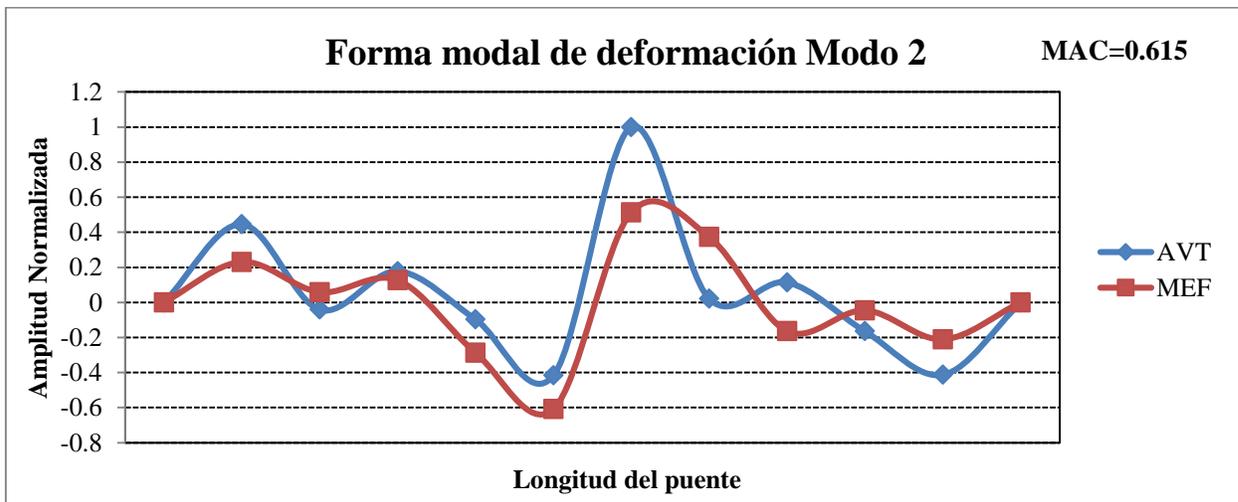


Figura 3.108 Forma modal del segundo modo de vibración

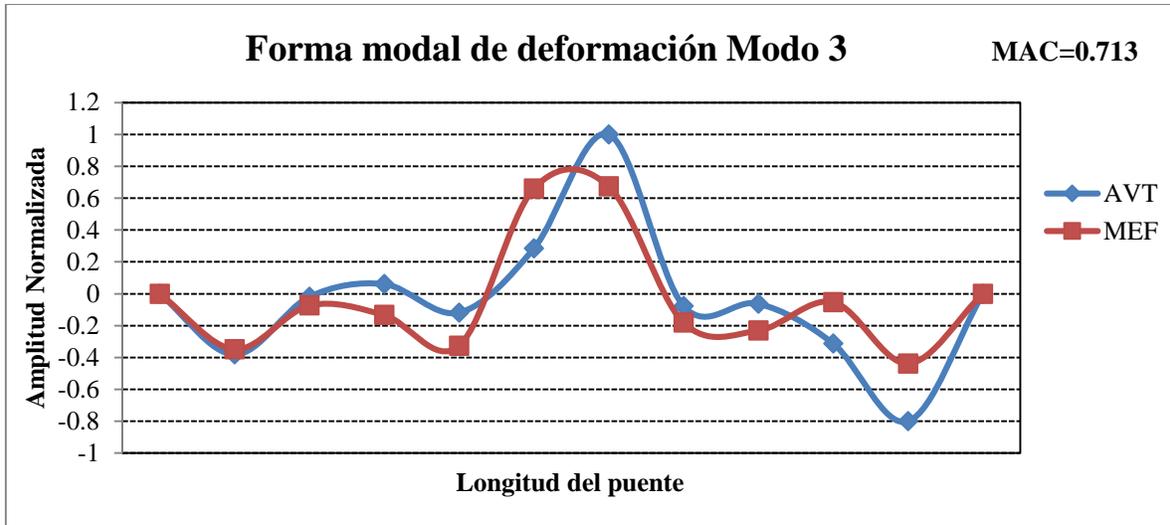


Figura 3.109 Forma modal del tercer modo de vibración.

Con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos de las señales del monitoreo remoto, se diseñó una prueba dinámica utilizando acelerómetros en el Puente Río Papaloapan; los acelerómetros fueron colocados tanto aguas abajo como aguas arriba en las posiciones de los tirantes 2, 7 y 12 de cada semi-arpa y al centro del claro central. Para las pruebas, se adquirió la respuesta dinámica de cada sensor en bloques de 5 minutos a una frecuencia de adquisición de 32 Hz. La señal típica de un acelerómetro ante excitaciones ambientales se muestra en la figura 3.110.

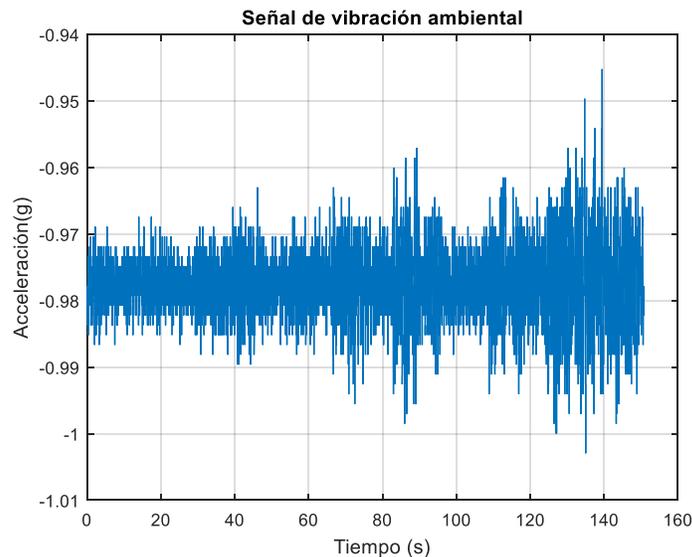


Figura 3.110 Respuesta dinámica de aceleración con vibración ambiental.

Las respuestas dinámicas de cada sensor fueron transformadas del dominio del tiempo, al dominio de la frecuencia; utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT) figura 3.111, y transformada de alta resolución de MUSIC, figura 3.112.

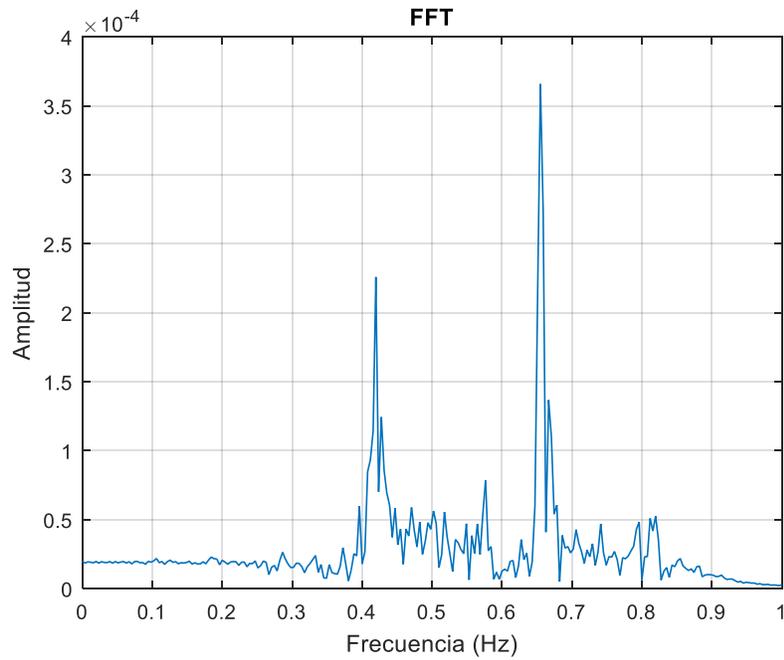


Figura 3.111 Espectro de Fourier para la respuesta dinámica de aceleración.

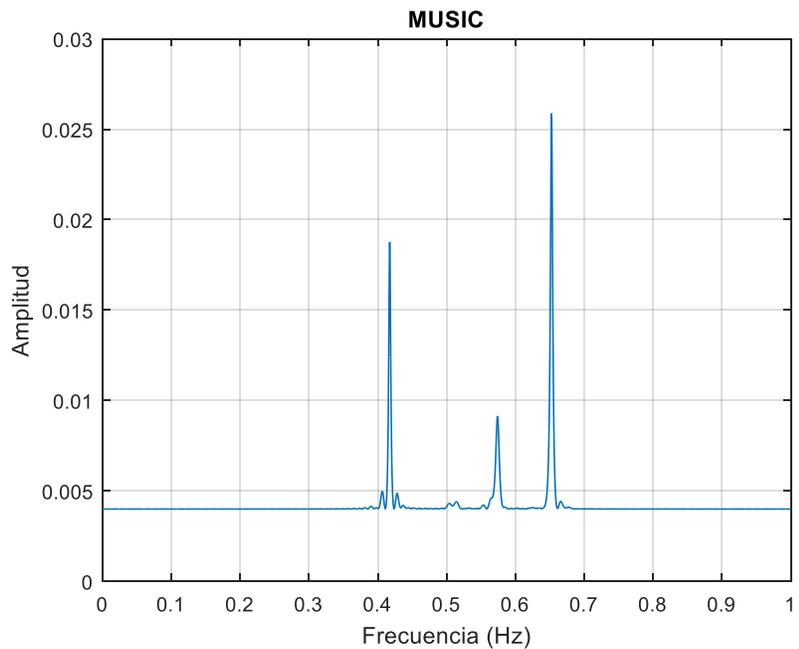


Figura 3.112 Espectro de MUSIC de la señal dinámica de aceleración

De los espectros de frecuencia, se identificaron tres frecuencias naturales en un rango de 0-1 Hz; tras obtener la amplitud y la fase de cada frecuencia de los acelerómetros y normalizarla, se obtuvieron las formas modales de desplazamiento de los tres primeros modos de vibrar del puente Río Papaloapan (figuras 3.113,

3.114 y 3.115), que fueron comparadas a través del Criterio de Aseguramiento Modal (MAC), con las formas modales de un modelo de elemento finito.

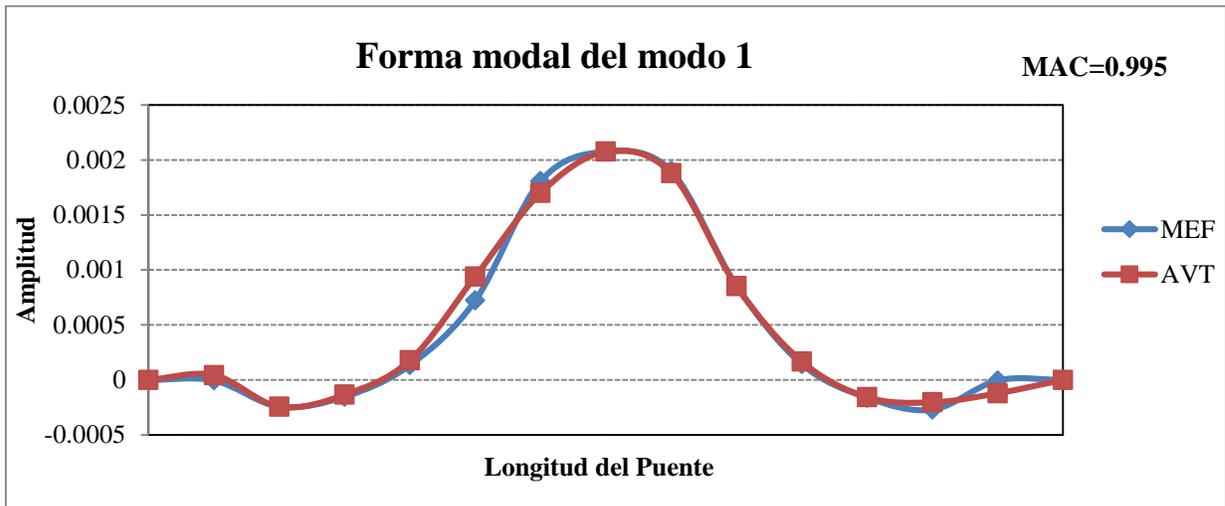


Figura 3.113 Forma modal del primero modo.

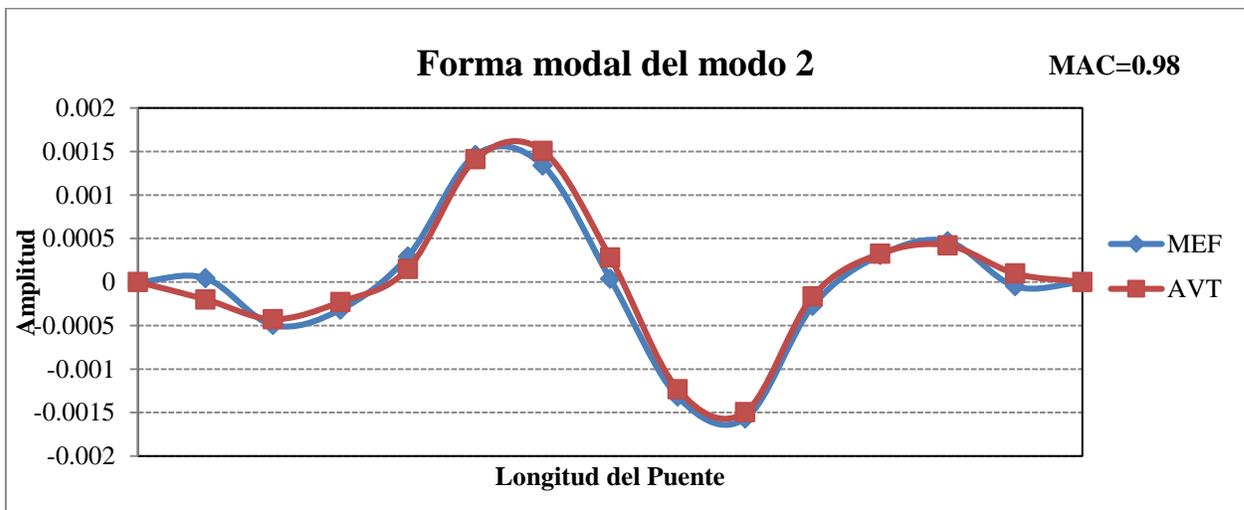


Figura 3.114 Forma modal del segundo modo.

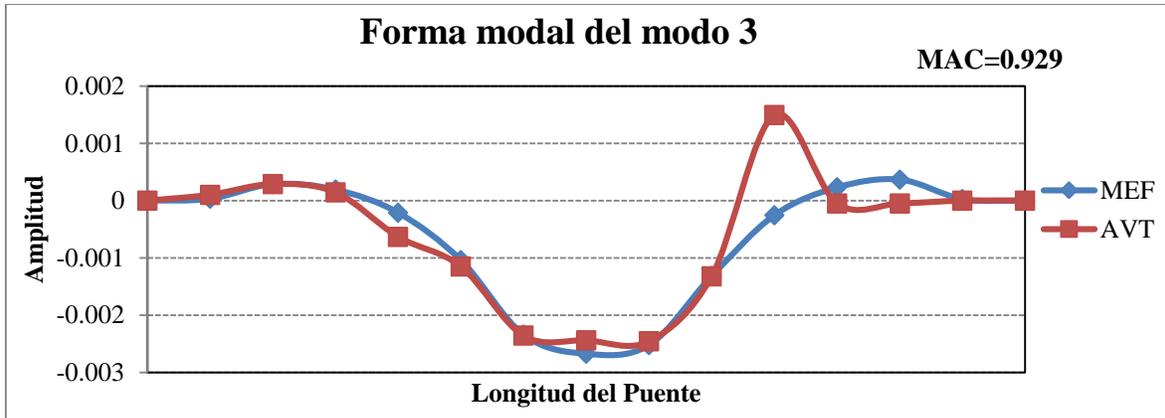


Figura 3.115 Forma modal del tercer modo.

Como se puede apreciar en las figuras 3.116, 3.117 y 3.118, existe una mejor correlación de las formas modales utilizando las respuestas dinámicas de los acelerómetros que cuando se utilizan las respuestas dinámicas de desplazamiento. En las figuras 3.116 a 3.117 se pueden observar las formas modales de los tres primeros modos obtenidas de los acelerómetros aguas arriba y aguas abajo, con lo cual se puede identificar si el modo es por flexión o por torsión, siendo los dos primeros modos por flexión del tablero y el tercero, un modo por torsión.

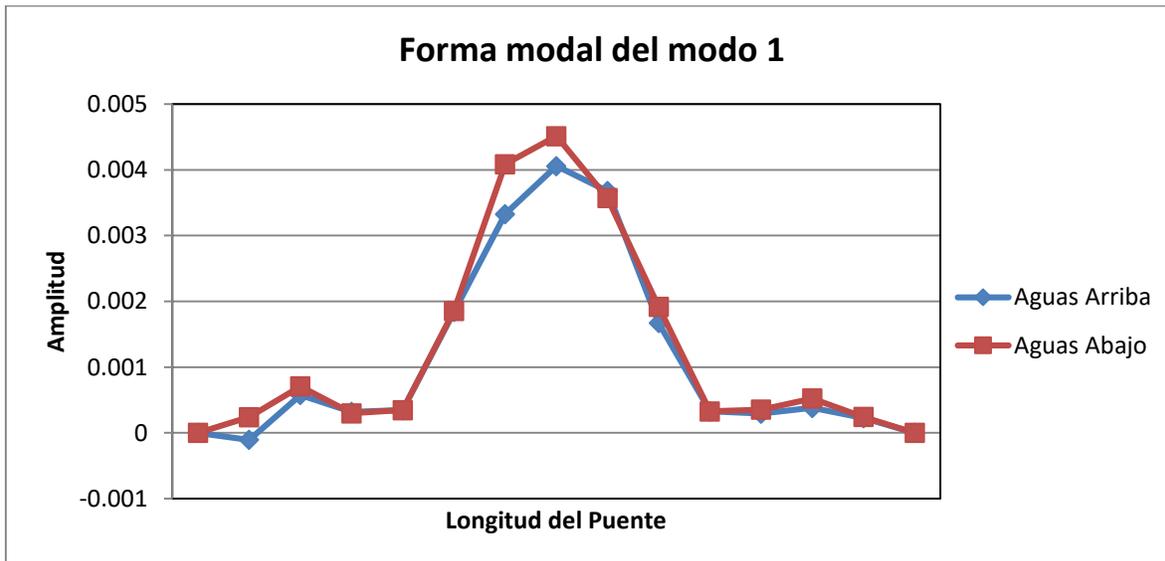


Figura 3.116 Forma modal del primer modo (Flexión del tablero)

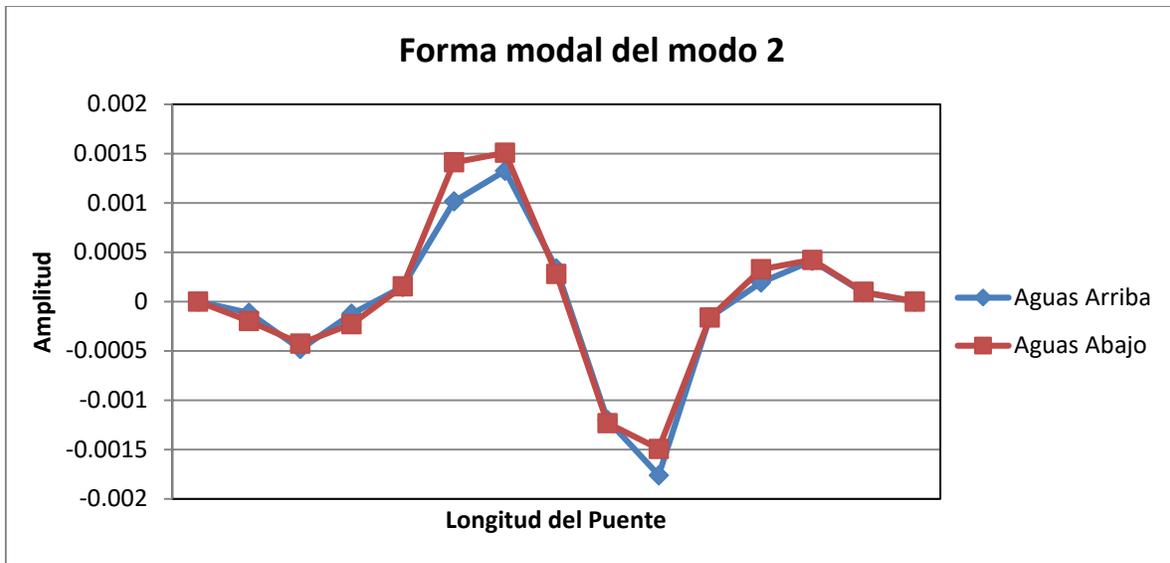


Figura 3.117 Forma modal del segundo modo (Flexión del tablero)

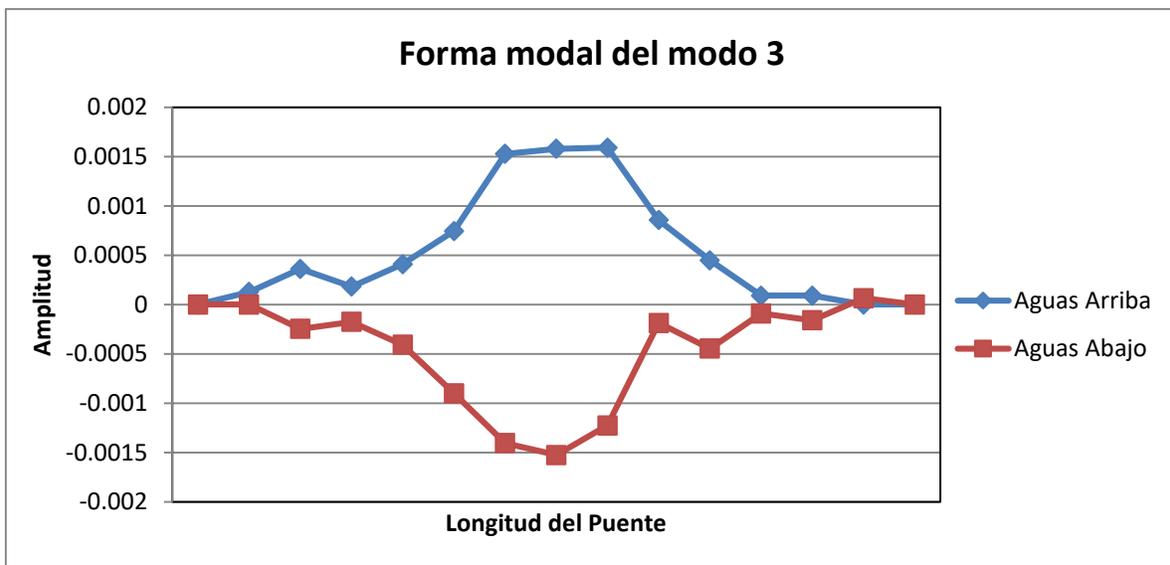


Figura 3.118 Forma modal del tercer modo (Torsión del tablero)

La tabla 3.2 presenta un resumen de los modos identificados por el modelo de elemento finito del puente Río Papaloapan y a través del análisis de las respuestas dinámicas de los extensómetros de fibra óptica y los acelerómetros instalados de manera temporal.

Tabla 3.2 Frecuencias naturales del Puente Río Papaloapan

f_{MEF} (Hz)	f_{STRAIN} (Hz)	f_{ACC} (Hz)	MACSTRAIN(%)	MACACC(%)
0.424	0.416	0.418	82	99.5
0.599	0.571	0.577	61.5	98.4
0.682	0.651	0.653	71.3	92.9

Conclusiones

El seguimiento y actualización de los parámetros estructurales permitieron evaluar la condición del puente Río Papaloapan después de la falla del anclaje superior del tirante 1 de la torre 2, aguas arriba, lado tierra; así como para realizar el análisis de falla, establecer la estrategia de evaluación para prevenir futuras fallas y rehabilitar el puente contando con procedimientos de seguimiento estructural para garantizar la integridad del puente en todo momento.

Derivado del análisis de la información del sistema de monitoreo se concluye que la tensión del tirante 1 de la semi-arpa 5 es de 196 toneladas aproximadamente, para tratar de recuperar las tensiones originales de los tirantes continuos de la semi-arpa 5 y los parámetros de deformación de las vigas antes de la falla es necesario ajustar las tensiones del tirante 1 de la semi-arpa 5 a 221 toneladas.

Actualmente, el puente se encuentra en condiciones adecuadas de servicio y seguridad, luego de haber recuperado su condición estructural a aquella antes de la falla, sin daños permanentes o severos por consecuencia de esta. Al tener identificados los elementos de anclaje con niveles de emisión acústica altos, queda definida la estrategia para rehabilitar el puente y continuar su monitoreo estructural.

Finalmente, en relación con las diferencias en los pesajes reportados en 2008 y 2016, se concluye que es importante uniformizar procedimientos para realizar los pesajes y contar con criterios de supervisión bien definidos para asegurar la calibración y utilización de los equipos de medición; con el objetivo de que exista repetibilidad en el pesaje, independientemente de quién lo ejecute.

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 Interno AF-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

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

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad
certificada bajo la norma ISO 9001:2015