



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Estrategias de evaluación y análisis del monitoreo del puente Río Papaloapan

Juan Antonio Quintana Rodríguez
Francisco Javier Carrión Viramontes
Saúl Enrique Crespo Sánchez
Daniel Rodríguez Naranjo
Luis Álvaro Martínez Trujano
Héctor Miguel Gasca Zamora
Daniel Arceo Mariñelarena
Andrés Hernández Guzmán
Jorge Alberto Hernández Figueroa

**Publicación Técnica No. 441
Sanfandila, Qro, 2015**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Estrategias de evaluación y análisis de monitoreo
del puente Río Papaloapan**

Publicación Técnica No. 441
Sanfandila, Qro, 2015

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 M. C. Daniel Rodríguez Naranjo, el Dr. Francisco Carrión Viramontes, el Ing. Héctor Miguel Gasca Zamora, el M. C. Saúl Enrique Crespo Sánchez, el M. C. Daniel Arceo Mariñelarena, el Ing. Luis Álvaro Martínez Trujano, el Ing. Andrés Hernández Guzmán y el Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa.

Se agradece la colaboración del 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

Resumen		iv
Abstract		vi
Resumen	Ejecutivo	viii
Capítulo 1.	Introducción	1
Capítulo 2.	Sistema de monitoreo del puente Río Papaloapan	3
Capítulo 3.	Estrategias de monitoreo para el puente Río Papaloapan	7
	3.1 Calibración del modelo de elemento finito del puente Río Papaloapan	7
	3.2 Estrategias de monitoreo locales	9
Capítulo 4.	Estrategias de monitoreo globales	39
Capítulo 5.	Estrategias de monitoreo de predicción e históricas	43
Capítulo 6.	Conclusiones	45
Bibliografía		47
Anexo 1	Histórico de tensiones del puente Río Papaloapan	49

Resumen

El puente Río Papaloapan es de tipo atirantado ubicado en el kilómetro 85 + 980 de la autopista la Tinaja-Acayucan en el estado de Veracruz, México; fue puesto en servicio en el año de 1995, tiene una longitud total de 407 m, con un claro máximo de 206 m y está suspendido por 8 semi-arpas de 14 tirantes cada una de ellas. La importancia de este puente dentro de la red federal carretera de México es primordial, ya que permite el intercambio económico entre el centro y sur del país; además, es una estructura a la cual se le han realizado fuertes inversiones económicas para llevar a cabo estudios y mantenimientos preventivos durante su vida útil debido a un proceso de construcción inadecuado. Lo anterior coloca al Puente Río Papaloapan como una estructura ideal y estratégica para la implementación de un sistema de monitoreo continuo y en tiempo real con la finalidad de garantizar la seguridad de los usuarios y su integridad estructural. Para lograr los objetivos planteados, en diciembre de 2012 se instalaron en el Puente Río Papaloapan, 24 medidores de deformación, 24 acelerómetros, 8 inclinómetros, 1 sensor de desplazamiento, 2 cámaras de video, una estación climatológica y una estación sismológica, los cuales integran el sistema de monitoreo remoto continuo en tiempo real energizado a través de 94 celdas fotovoltaicas. La información recibida por los sensores instalados es utilizada para generar distribuciones estadísticas de las cargas vivas presentes en el puente, líneas de tendencia de los registros, calibrar modelos matemáticos para la búsqueda de daño global en la estructura, realizar prognosis de la integridad estructural a través de simulación Monte-Carlo y calcular índices de confiabilidad del Puente Río Papaloapan. En este trabajo se presentan algunos de los primeros resultados de la evaluación estructural y de las estrategias que se han implementado para el manejo, uso y análisis de la información recabada en estos primeros meses de monitoreo.

Abstract

The Papaloapan River Bridge is a bridge of cable-stayed type located at the kilometer 85 + 980 highway the Tinaja-Acayucan in Veracruz State, Mexico, it was put into service in the year of 1995, has a total length of 407 m, with a clear maximum of 206 m and is suspended for 8 semi-arpas of 14 straps each of them. The importance of this bridge within the federal highway network in Mexico is essential, since it allows the economic exchange between the Centre and South of the country, is also a structure to which you have made strong economic investment studies and preventive maintenance during its lifetime due to an inappropriate construction process. The above gives the Papaloapan River Bridge as an ideal and strategic structure for the implementation of a system of continuous monitoring in real time in order to ensure the safety of users and its structural integrity. To achieve the objectives set, in December 2012 settled in the Papaloapan River Bridge, 24 deformation gauges, 24 accelerometers, inclinometers 8, 1 displacement sensor, 2 video cameras, a weather station and a seismological station, which integrate the system of remote monitoring continuous real-time energized through 94 photovoltaic cells. The information received by installed sensors is used to generate statistical distributions of live loads on the bridge, records trendlines, calibrate mathematical models for the search of global damage in the structure, perform prognosis of structural integrity through Monte-Carlo simulation and calculating indices of reliability of the Papaloapan River Bridge. This paper presents some of the first results of the structural assessment and strategies that have been implemented for the management, use and analysis of the information collected in these first months of monitoring.

Resumen ejecutivo

A principios del año 2013 se instrumentó y comenzó la evaluación del Puente Río Papaloapan con la finalidad de garantizar su integridad estructural. La información fue 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 evaluación estructural y estrategias que se han implementado a la fecha.

1 Introducción

El Puente Río Papaloapan se localiza en el kilómetro 85 + 980 de la autopista la Tinaja-Acayucan, en el estado de Veracruz, fue construido en el año de 1994 y se puso en servicio en el año de 1995. Este puente es del tipo atirantado, con un claro principal de 203 m y una longitud total de 407.21 m. El puente tiene 112 cables distribuidos en 8 semi-arpas con 14 cables por cada semi-arpa (López *et al.*, 2009). Las semi-arpas se identifican de la 1 a la 8 (ver figura 1.1) y los cables se numeran del 1 al 14, comenzando la identificación del cable más corto al cable más largo. En el año 2000, a 5 años de iniciar la operación del puente, uno de los 112 elementos de anclaje superior, elemento estructural parcialmente embebido en la torre, presentó una falla repentina que provocó el desprendimiento del tirante 11 de la semi-arpa 7; debido a la falla, el puente permaneció con 111 tirantes en operación durante dos meses, el corte generó una deformación permanente al centro del claro principal del puente que ya no fue posible recuperar después de ser sustituido el elemento de anclaje dañado y tensado, el tirante 11. Empresas especializadas y centros de investigación y evaluación de estructuras y materiales mexicanos dictaminaron que la causa principal de la falla fue el daño asociado a un material de fundición con un tratamiento térmico posterior deficiente, muy frágil y con alto contenido de poros e inclusiones. Ante el dictamen realizado existía la preocupación de conocer el estado de los 111 elementos de anclaje restantes y determinar si la falla del elemento de anclaje superior, con deficiencias de fabricación, fue aislada o si algunos o todos los elementos de anclaje superior presentaban los mismos problemas en su fabricación. Estudios de ultrasonido industrial concluyeron que 16 de los elementos de anclaje superior tenían patrones similares al que había fallado, alta porosidad y fragilidad del material constitutivo, por lo que fueron reemplazados junto con otros cuatro en buen estado. Con los elementos de anclaje superior sustituidos se formó una muestra representativa de los 92 restantes y se realizó un estudio de confiabilidad para determinar la probabilidad de falla de los elementos estructurales de anclaje superior del Puente Río Papaloapan.

El Puente Río Papaloapan es un ejemplo de un puente de gran envergadura en la red federal carretera, importante en la economía del país debido a que es la principal vía de comercio entre el centro y sureste, además del costo de inversión en la construcción del puente y la problemática que presentó, lo convierten en una estructura ideal para instrumentar y tener un monitoreo y evaluación continua y en tiempo real para dar seguimiento oportuno de las variables críticas identificadas con riesgo, garantizar la seguridad de los usuarios y preservar la infraestructura del país.

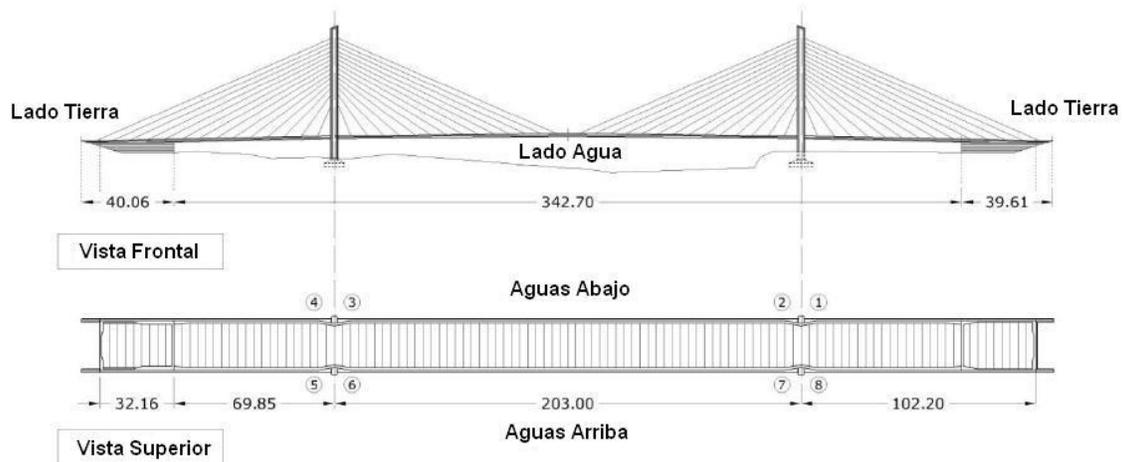


Figura 1.1 Esquema general del puente Río Papaloapan

El puente Río Papaloapan es el primer puente instrumentado, monitoreado en tiempo real y evaluado de forma continua y permanente por el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, por lo que es estratégico mostrar las ventajas y beneficios en materia de seguridad, programas de actuación ante situaciones de riesgo estructural, detección de daño oportuno y conservación de la infraestructura.

2 Sistema de monitoreo del puente Río Papaloapan

Durante el último trimestre del año 2012 se realizó la instrumentación y puesta en marcha de un sistema de monitoreo permanente basado en sensores de fibra óptica para el Puente Río Papaloapan. La configuración del sistema consideró en una primera etapa la instalación de 96 celdas fotovoltaicas y 36 baterías de ciclado profundo en las torres 2 y 3 (ver figura 2.1). Las celdas fotovoltaicas fueron colocadas paralelas a las caras de las torres para prevenir un posible daño por las fuertes ráfagas de viento en la zona. Durante la segunda etapa de instrumentación se instaló un sistema de adquisición de datos basado en sensores de fibra óptica, el cual consiste de 15 lazos de fibra óptica que son muestreados por un interrogador SM-130-700 y un Multiplexor SM-041-416 de la marca Micron Optics a una frecuencia de muestreo de 500 muestras por segundo. El sistema de monitoreo está formado por 24 medidores de deformación para concreto, de los cuales 11 fueron instalados sobre la cara inferior de la viga principal del puente del lado aguas abajo y 11 en la viga principal del lado aguas arriba, estos sensores se encuentran distribuidos aproximadamente cada 30 metros en una longitud total de 407 m, y 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. Adicionalmente se colocaron 24 acelerómetros, 16 de ellos quedaron ubicados en los tirantes 4 y 11 de cada semi-arpa del puente a la mitad de la longitud total del tirante de sujeción, y los ocho restantes en la parte superior de las 4 torres, dos para cada torre, con el objetivo de registrar las aceleraciones en las direcciones “X” y “Y”; además, se colocaron ocho inclinómetros en la parte superior de las torres, dos inclinómetros para cada torre, uno para el plano “XZ” y el otro para el Plano “YZ” y, finalmente, se instaló un medidor de desplazamiento en una de las juntas de expansión (ver figura 2.2). Adicionalmente 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 ubicada 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 se colocaron dentro de un gabinete con temperatura y humedad controladas, éste se ubicó a una altura de 12 m en la torre 2, aguas abajo (ver figura 2.3).

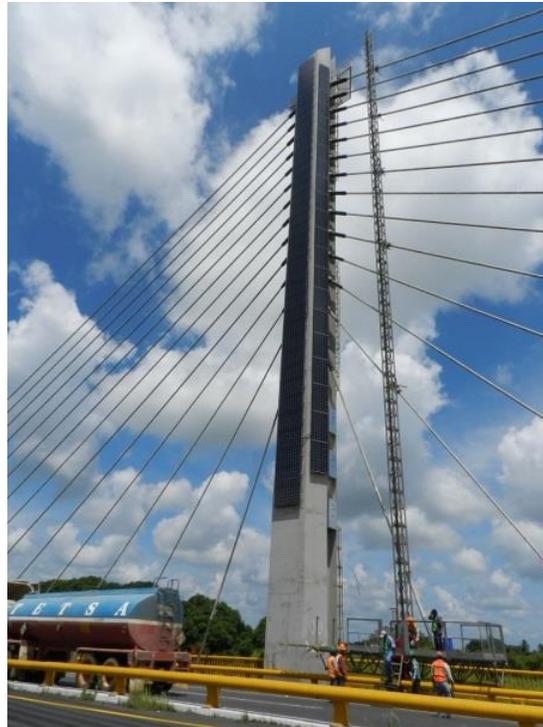


Figura 2.1 Sistema de alimentación eléctrica

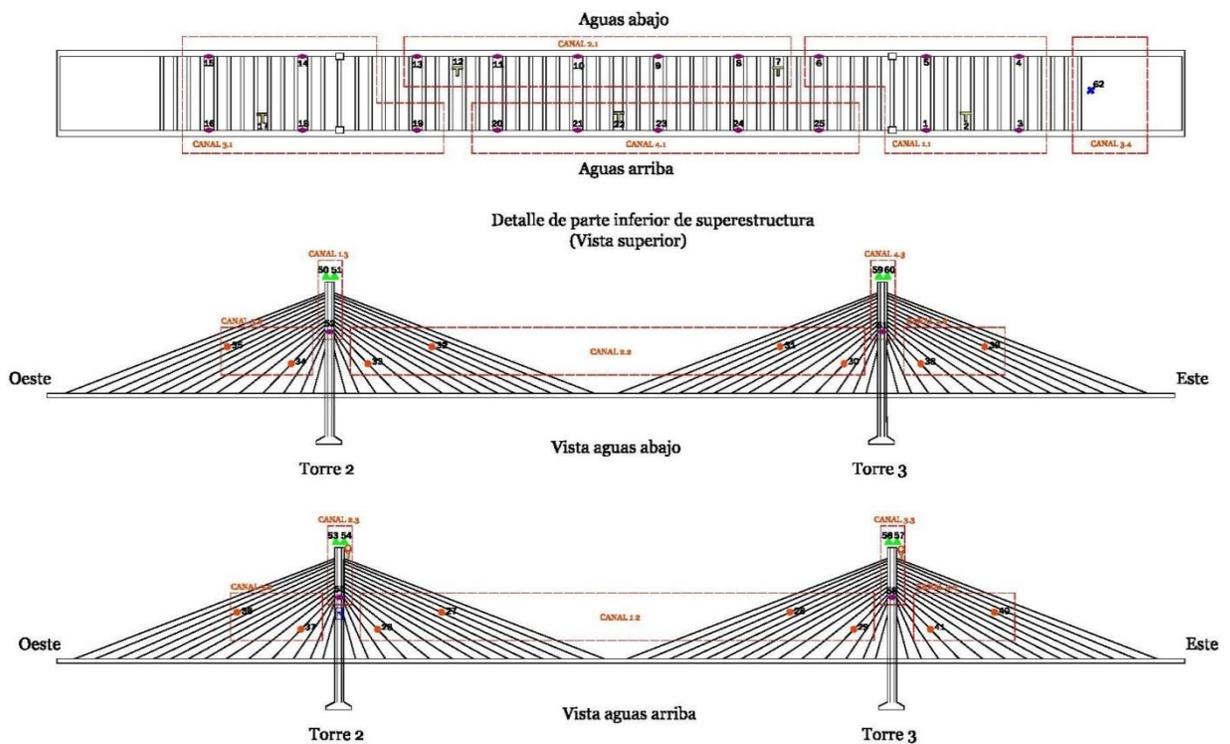


Figura 2.2 Diagrama de Instalación del sistema de monitoreo estructural del puente Río Papaloapan



Figura 2.3 Panel de control del sistema de monitoreo.

3 Estrategias de monitoreo para el puente Río Papaloapan

La cantidad de información recibida por el sistema de adquisición de datos y la obtención de parámetros estructurales que califiquen la integridad del Puente Río Papaloapan hace necesario e imprescindible el desarrollo de estrategias de monitoreo que cumplan con el objetivo tanto de garantizar la seguridad de los usuarios como de identificar problemas estructurales antes de que se conviertan en críticos. Las estrategias de monitoreo se han clasificado en tres categorías; la primera categoría se denominó estrategias de monitoreo locales, en éstas, se analiza el comportamiento de la estructura local a través del análisis estadístico de los datos de cada sensor de acuerdo al tipo de sensor; la segunda categoría se nombró estrategias de monitoreo globales, en éstas, se analiza el comportamiento de la estructura de manera global a través del análisis de la información por grupos de sensores del mismo tipo y, finalmente, la tercera categoría, llamada estrategias de monitoreo de predicción e históricas, en éstas se analiza la información de los sensores de manera global y local y se generan tendencias del comportamiento estructural del puente en el tiempo, apoyados con técnicas de detección de daño, simulación Monte Carlo y estudios de pronosis. Por otra parte, en esta categoría, se tiene un archivo histórico con información del monitoreo de eventos atípicos como sismos, fuertes ráfagas de viento, accidentes y sobrecargas vehiculares, lo anterior con el objetivo de analizar el comportamiento estructural del puente bajo este tipo de condiciones y generar datos de referencia de aceleraciones, desplazamientos y deformaciones máximas registradas durante los eventos atípicos y así identificar patrones característicos del comportamiento estructural.

Una de las primeras actividades para la implementación de las estrategias de monitoreo fue la elaboración y calibración del Modelo de Elemento Finito del puente Río Papaloapan: El modelo calibrado permite establecer alarmas, a través de la simulación de escenarios de cargas vivas o de daño estructural, para cada una de las estrategias de monitoreo; adicionalmente, es una herramienta importante para la evaluación de la estructura después de eventos atípicos, búsquedas programadas de detección de daño, y estudios de pronosis.

3.1 Calibración del modelo de elemento finito del puente Río Papaloapan

Para la calibración de los parámetros estructurales del modelo de EF del puente Río Papaloapan, se diseñaron dos conjuntos de pruebas experimentales: la primera; corresponde al monitoreo de las tensiones de los 112 tirantes utilizando

los acelerómetros instalados en las semi arpas instrumentadas y un equipo dinámico portátil. Para calcular las tensiones en los cables atirantados del puente se utilizó la respuesta dinámica de los acelerómetros y los espectros de frecuencia para cada uno de los tirantes de sujeción y, una vez conocidas sus frecuencias naturales, se calculó la tensión de cada tirante con un modelo matemático no lineal (Carrión *et al.*, 2007). El segundo grupo de pruebas fue a través de una prueba de impacto, bajo condiciones controladas. La excitación del puente, a diferencia del primer grupo de pruebas, se hizo sin tráfico, utilizando un equipo de impacto Dynatest (figura 3.1). En este caso, el equipo libera desde una altura controlada, una masa conocida, la cual produce una excitación sobre el puente.



Figura 3.1 Panel de control del sistema de monitoreo.

Para la calibración y simulación de los eventos estáticos y dinámicos se utilizó el paquete de elemento finito StaDyn versión 4.54 (Doyle, 2007). La calibración del modelo de EF del Puente Río Papaloapan, se desarrolló en 4 etapas: La primera etapa consistió en la elaboración del modelo geométrico, la cual se realizó a partir de los planos estructurales del Puente. La segunda etapa fue la asignación de las propiedades del material de los elementos estructurales a través de datos de diseño. La tercera etapa fue la ejecución de pruebas experimentales en campo para conocer la respuesta dinámica de la estructura o de algunos de sus componentes estructurales y, finalmente, la cuarta fue la calibración del modelo de EF a partir de los datos del monitoreo y de las pruebas experimentales. Para la construcción del modelo de EF, se utilizaron 8224 elementos y 4693 nodos, en promedio se emplearon 12 elementos a lo ancho del puente en una longitud de 23.1 m y 580 elementos a lo largo del puente en una longitud de 407,2 m, se usaron aproximadamente 1200 elementos para representar los 112 tirantes y las cuatro torres. Respecto a las condiciones de frontera, las cuatro torres se consideraron empotradas, se restringió el movimiento en la dirección z en los estribos que se encuentran en el tirante 10 de las semi-arpas 1, 4, 5 y 8 lado tierra, y los apoyos se consideraron simplemente apoyados. Calibrados todos los

parámetros estructurales del modelo de EF del Puente, se realizó una comparación de las tensiones registradas experimentalmente y las obtenidas por el modelo de elemento finito (figuras 3.2 y 3.3).

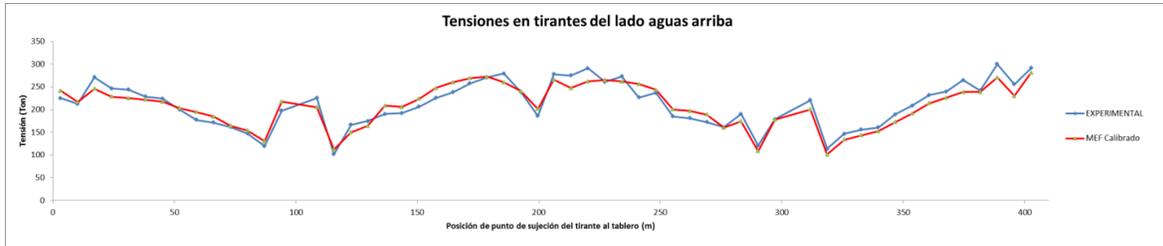


Figura 3.2 Tensiones del modelo de elemento finito para los tirantes del lado aguas abajo

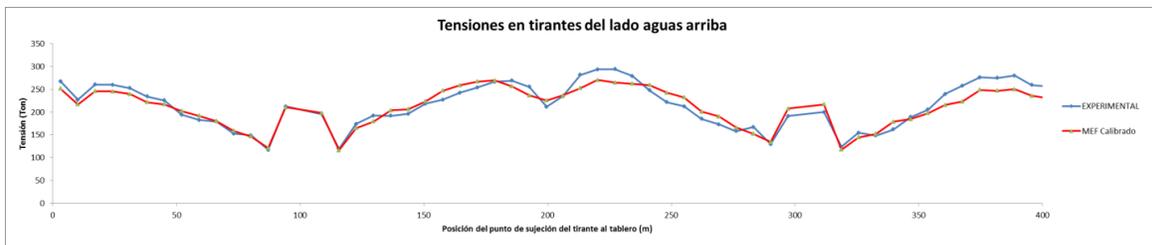


Figura 3.3 Tensiones del modelo de elemento finito para los tirantes del lado aguas arriba.

3.2 Estrategias de monitoreo locales

Las estrategias locales se basan en el seguimiento del comportamiento estructural del puente por cargas vivas (flujo vehicular, viento) y condiciones climatológicas. Los datos adquiridos en más de un año de monitoreo continuo se han analizado utilizando herramientas estadísticas para cada sensor instalado en el puente. Los datos se analizan por periodos de tiempo de 15 días, se obtiene la distribución estadística, el valor de la media y la desviación estándar de cada sensor. En el caso de los extensómetros se realiza un análisis detallado, los sensores son muy sensibles al paso de los vehículos, por lo que se obtienen las amplitudes de la deformación registradas por las cargas vivas y la deformación en el puente por cambios de temperatura, ambos datos se analizan de manera separada y generan una distribución estadística para cada efecto. Los sensores de aceleración se clasifican en dos grupos, los instalados en los tirantes 4 y 11 de las 8 semi-arpas y los instalados en las cuatro torres, uno en dirección longitudinal y otro en la dirección transversal del puente (dirección x, y). Con la información de los acelerómetros del primer grupo se calcula la tensión de los tirantes, con la respuesta dinámica del acelerómetro se obtienen las primeras frecuencias naturales de cada tirante y, posteriormente, la tensión; es importante señalar que los datos del monitoreo continuo, son segmentados en periodos de tiempo de dos minutos y con éstos se calcula la transformada de Fourier y la tensión correspondiente. Con los datos de las tensiones se obtiene la distribución

estadística de la tensión para cada tirante con su respectiva media y desviación estándar. Para el segundo grupo de acelerómetros únicamente se obtienen las frecuencias naturales de las torres en las dos direcciones y se comparan con las obtenidas por un modelo de elemento finito calibrado de las torres del puente Río Papaloapan. En el caso de los inclinómetros instalados en las torres se realiza un seguimiento similar, los cambios que presentan estos sensores son menores y son afectados principalmente por cambios térmicos.

La figura 3.4 contiene información de un año de monitoreo registrada por un sensor cercano a la mitad del claro principal, sensor 9 (figura 2.2), del lado aguas abajo. En la figura 3.4, el eje de las ordenadas está asociado al valor de la media de las mediciones de las amplitudes de deformación por tráfico vehicular, para este sensor en particular los datos satisfacen una distribución estadística del tipo inversa gaussiana para cada paquete de información de 15 días de monitoreo. Los límites superior e inferior mostrados en la figura 8 se asocian a los valores de $\pm 2.5 \sigma$ del valor de la media de una distribución normal obtenida a partir de los valores de las medias de las distribuciones inversas gaussianas para el sensor 23. Los límites anteriores delimitan el primer nivel de alarma bajo condiciones de operación normal con el tráfico actual, 11 000 vehículos por día en promedio. De manera similar, se realiza un análisis para el resto de los sensores de deformación, por lo que cada sensor tiene sus propios límites bajo condiciones de operación normal, tanto para cargas vivas como para cargas térmicas.

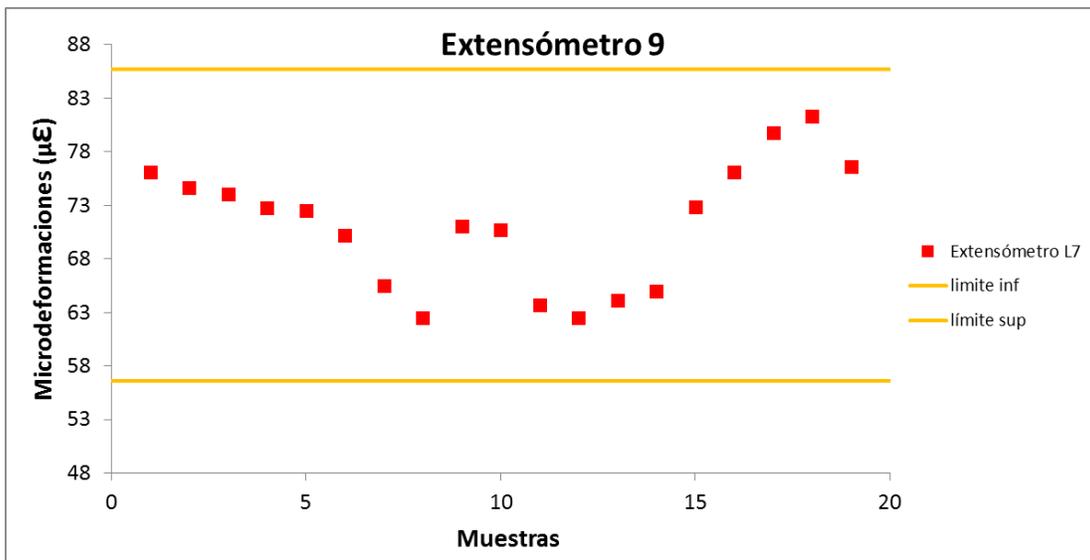


Figura 3.4 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 23

Las figuras de la 3.5 a la 3.14 muestran los gráficos del comportamiento de la deformación por carga viva bajo condiciones de operación normal para los sensores 16,18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 1 y 3, todos estos sensores de deformación se encuentran en la viga principal del lado aguas abajo. Estas primeras figuras contienen las medias de las cargas vivas a tensión. Mientras que en la tabla 3.1 se

puede observar el tipo de distribución estadística que ajusta a cada uno de los sensores mencionados.

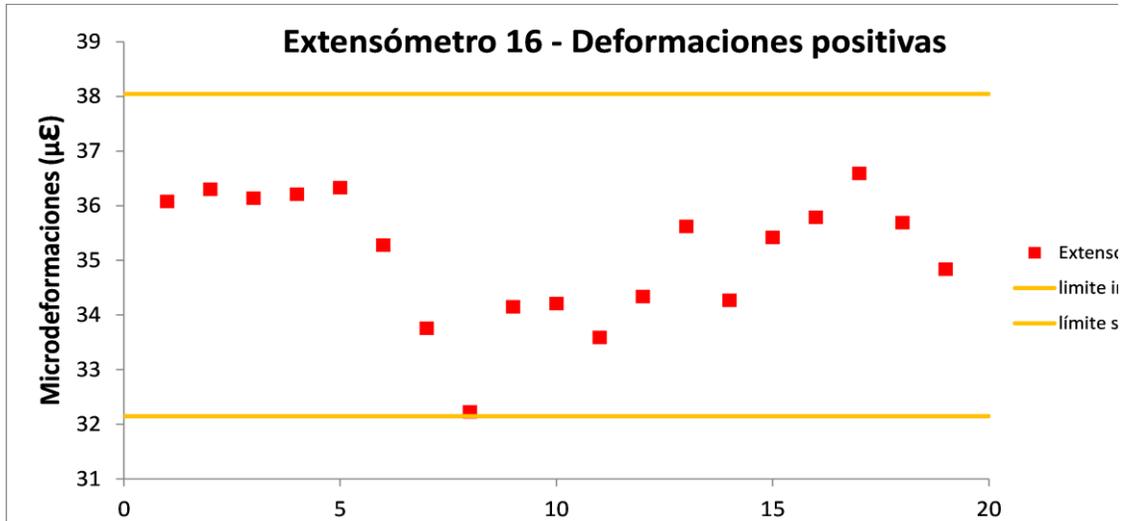


Figura 3.5 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 16.

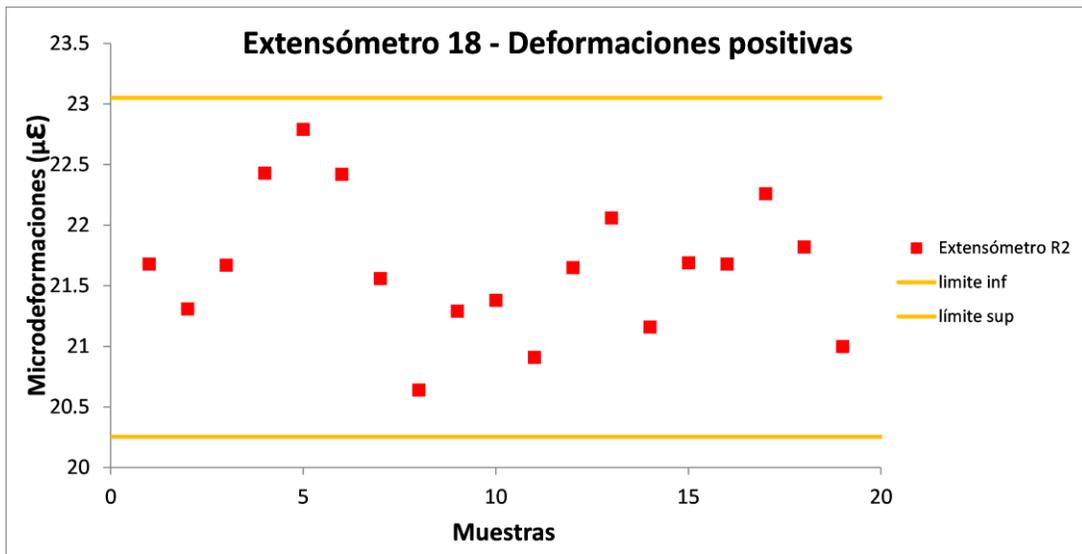


Figura 3.6 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 18.

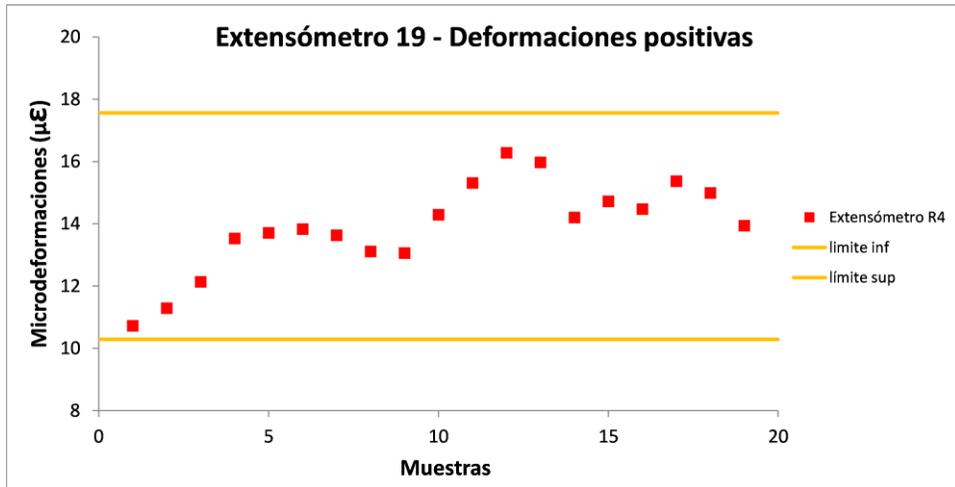


Figura 3.7 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 19.

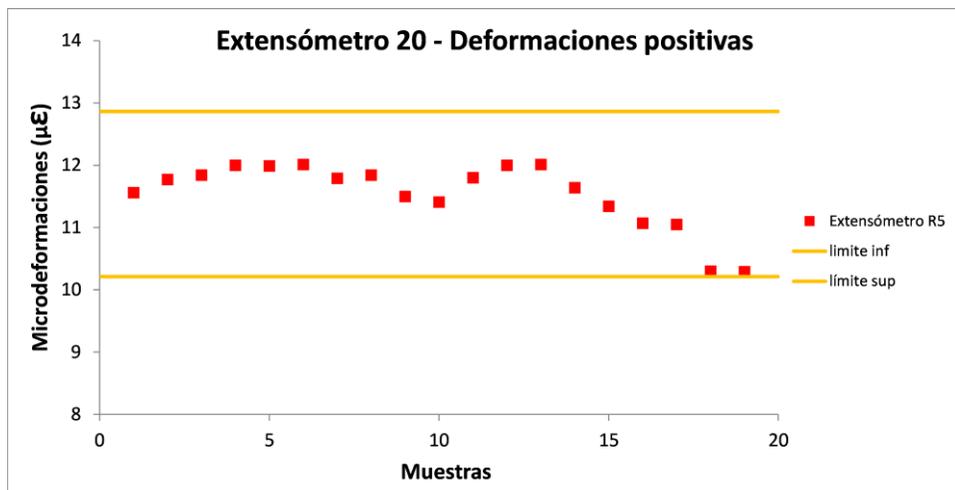


Figura 3.8 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 20.

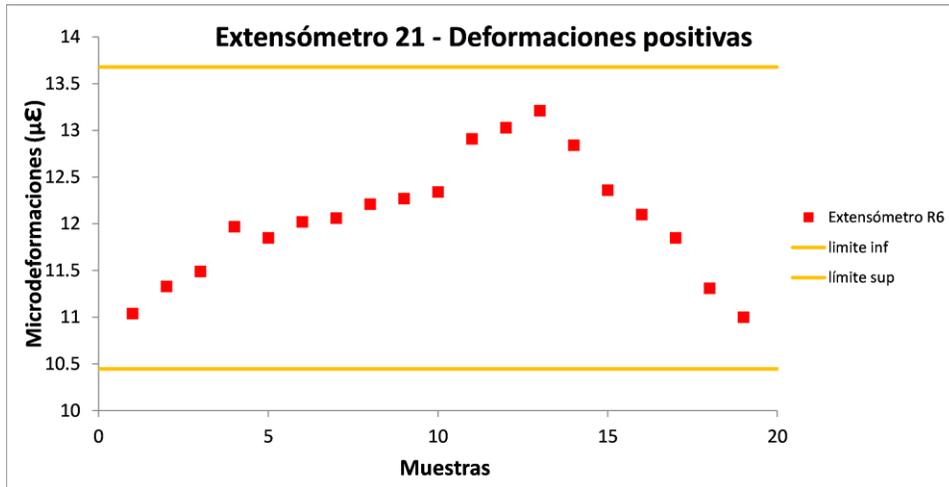


Figura 3.9 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 21.

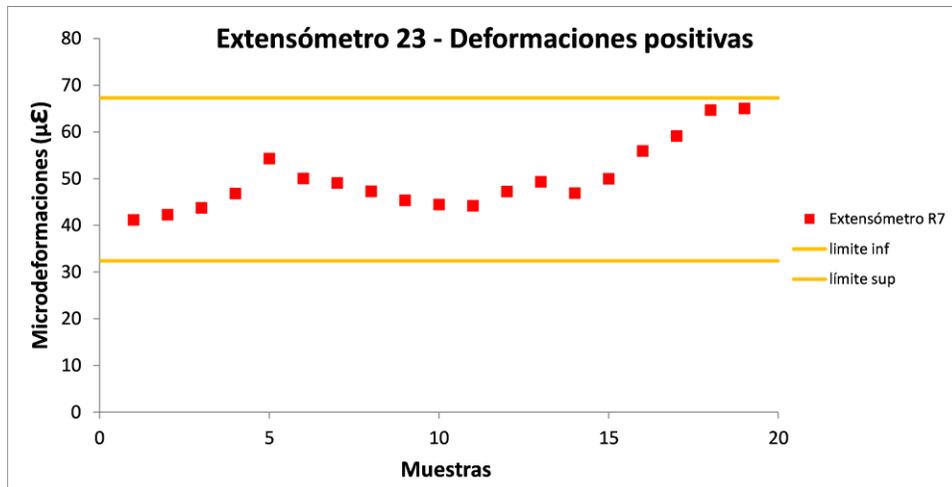


Figura 3.10 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 23.

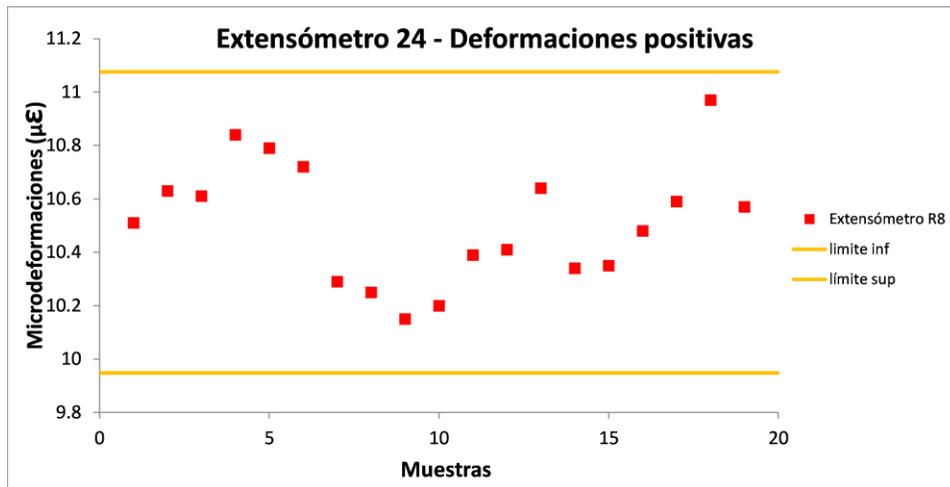


Figura 3.11 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 24.

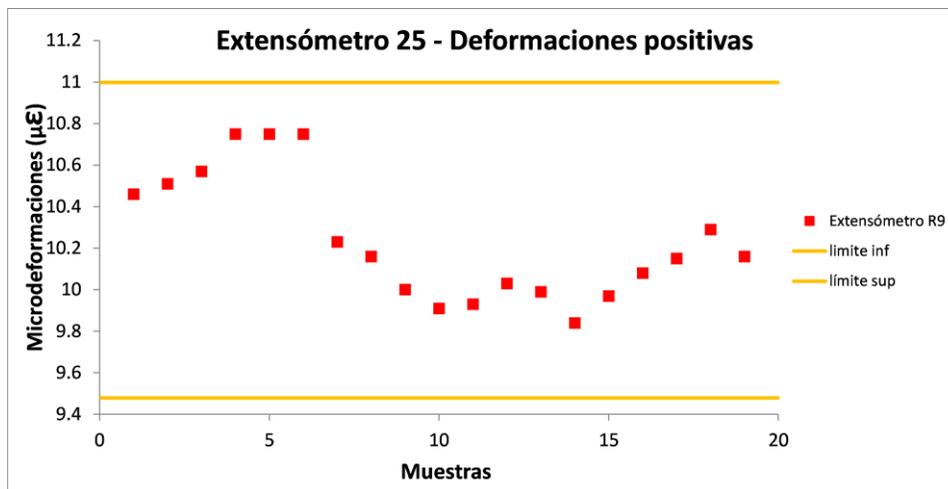


Figura 3.12 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 25.

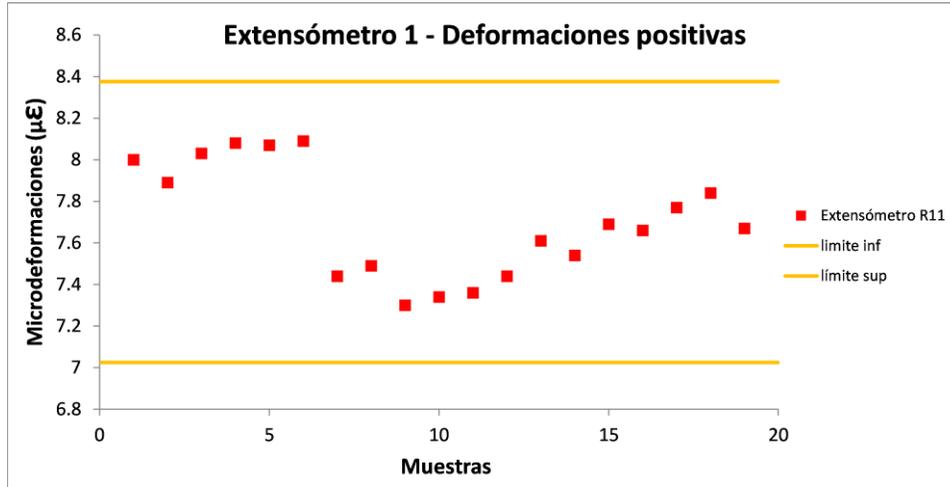


Figura 3.13 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 1.

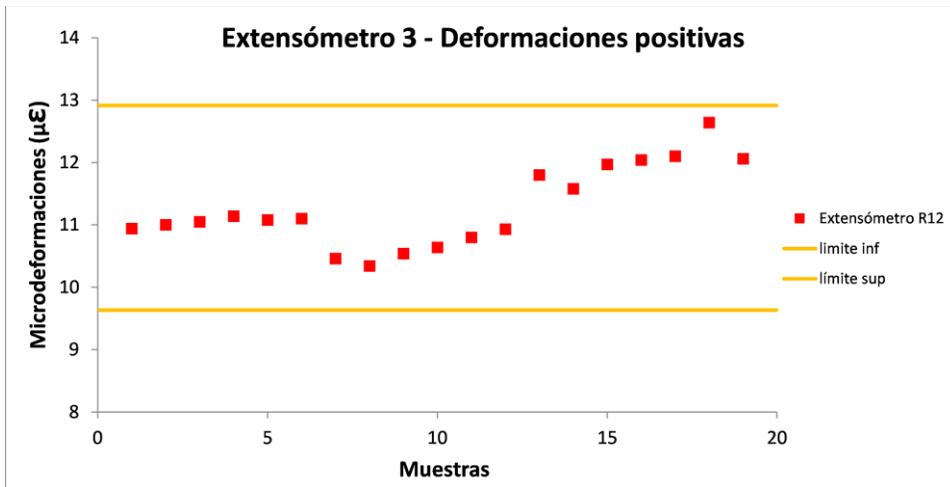


Figura 3.14 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 3.

Tabla 3.1 Tipo de distribución estadística en los extensómetros para deformación a tensión por carga viva aguas arriba.

Extensómetro	Tipo de distribución estadística
16	Inversa Gaussiana
18	Inversa Gaussiana
19	Pearson 5
20	Inversa Gaussiana
21	Normal
23	Inversa Gaussiana
24	Inversa Gaussiana
25	Pearson 5
1	Inversa Gaussiana
3	Inversa Gaussiana

Fuente: Elaboración propia. 2015

Las figuras de la 3.15 a la 3.24 muestran los gráficos del comportamiento de la deformación por carga viva bajo condiciones de operación normal para los sensores 15,14, 13, 11, 10, 9, 8, 6, 5 y 4, todos estos sensores de deformación se encuentran en la viga principal del lado aguas arriba. Las figuras contienen las medias de las cargas vivas a tensión. Mientras que en la tabla 3.2 se puede observar el tipo de distribución estadística que ajusta a cada uno de los sensores mencionados.

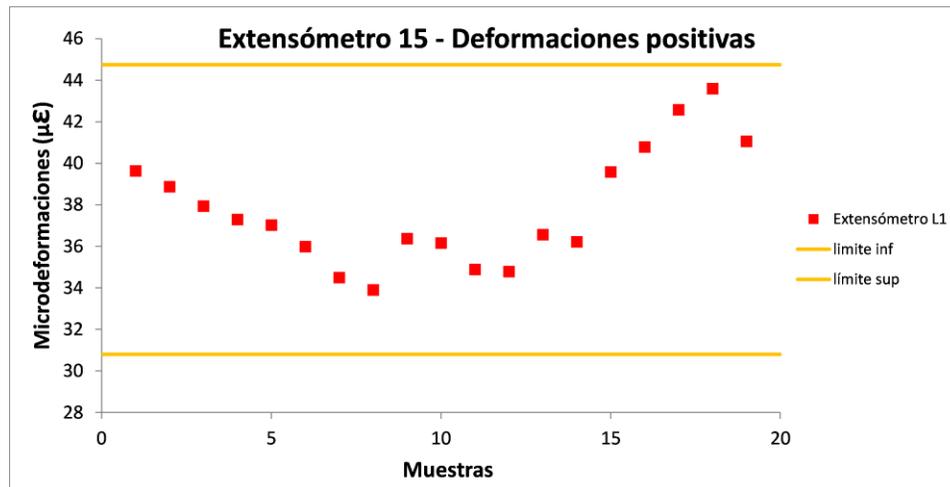


Figura 3.15 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 15.

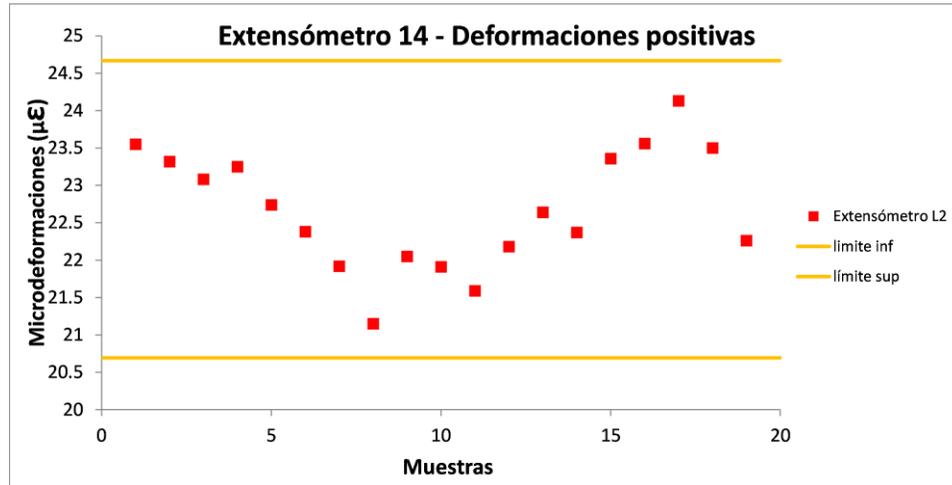


Figura 3.16 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 14.

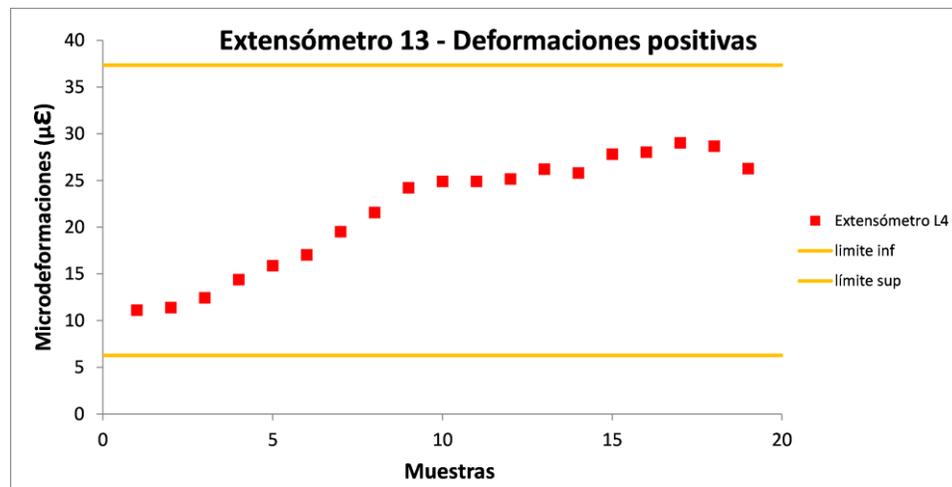


Figura 3.17 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 13.

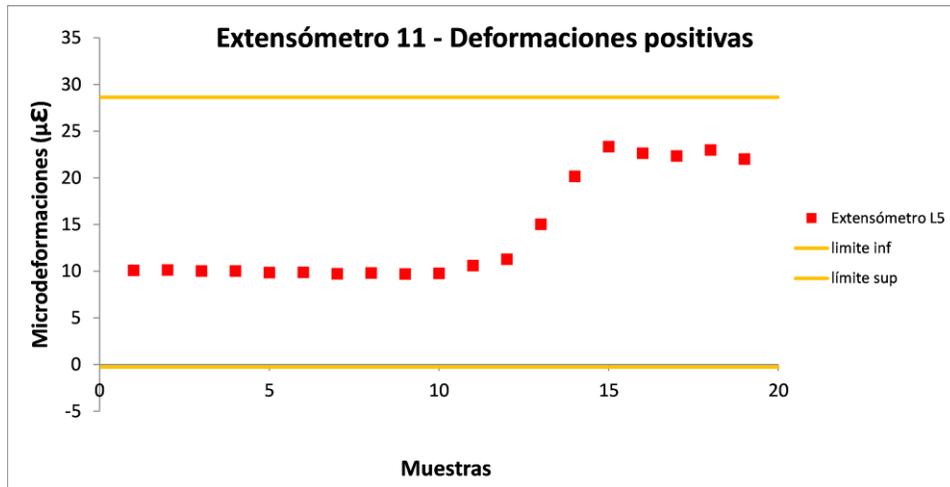


Figura 3.18 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 11.

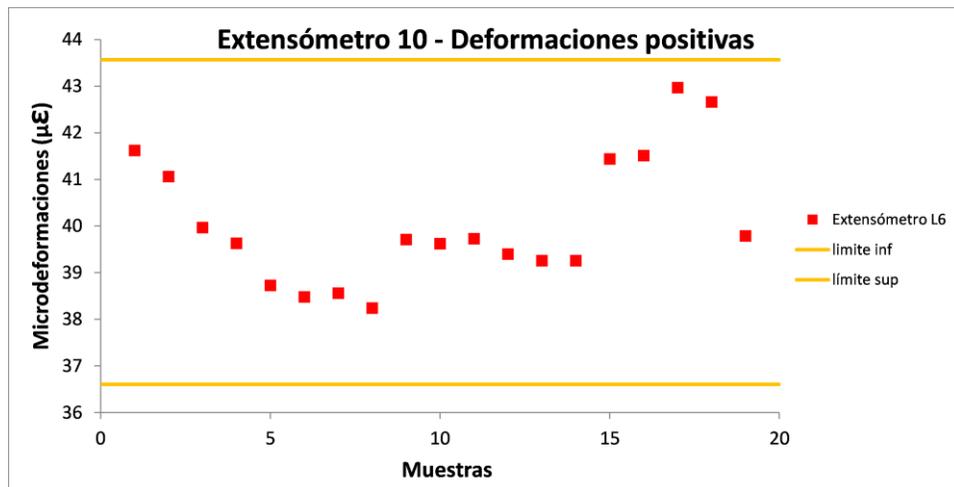


Figura 3.19 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 10.

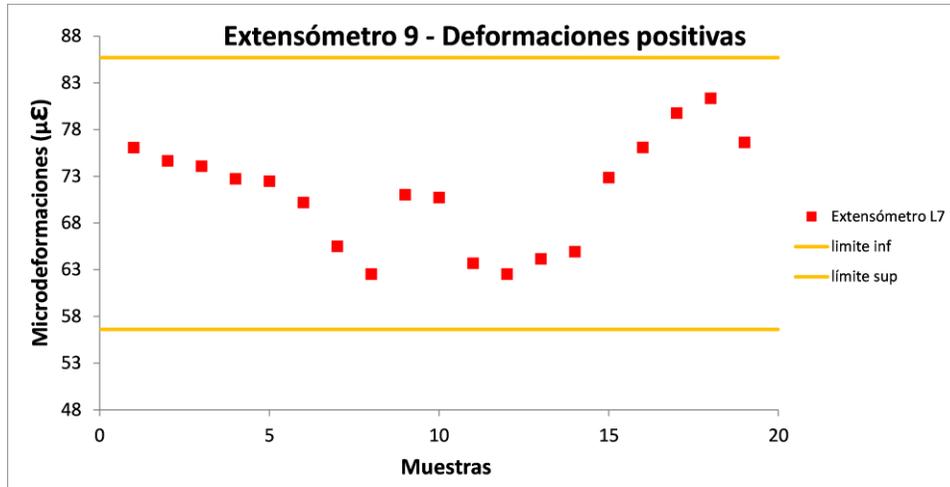


Figura 3.20 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 9.

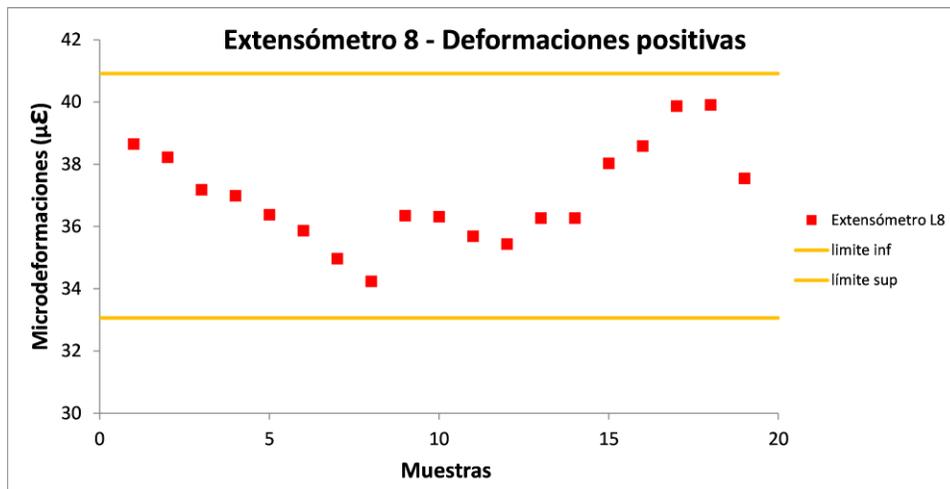


Figura 3.21 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 8.

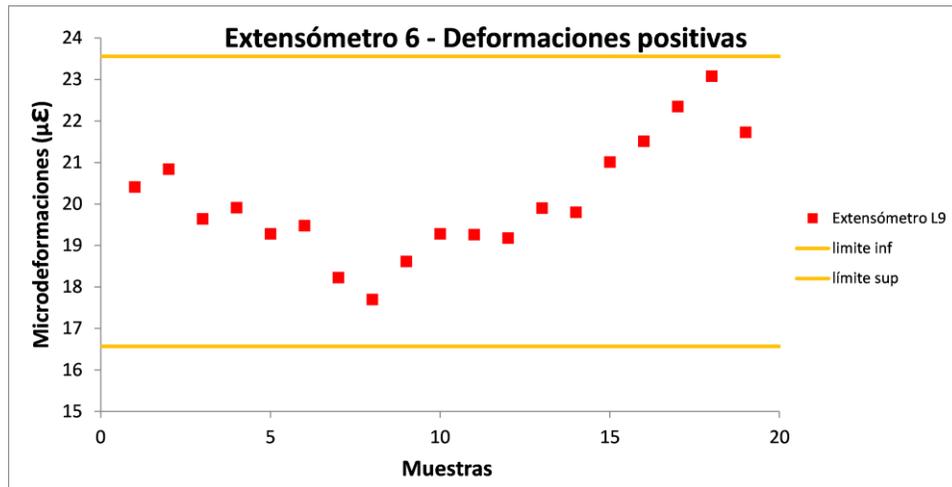


Figura 3.22 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 6.

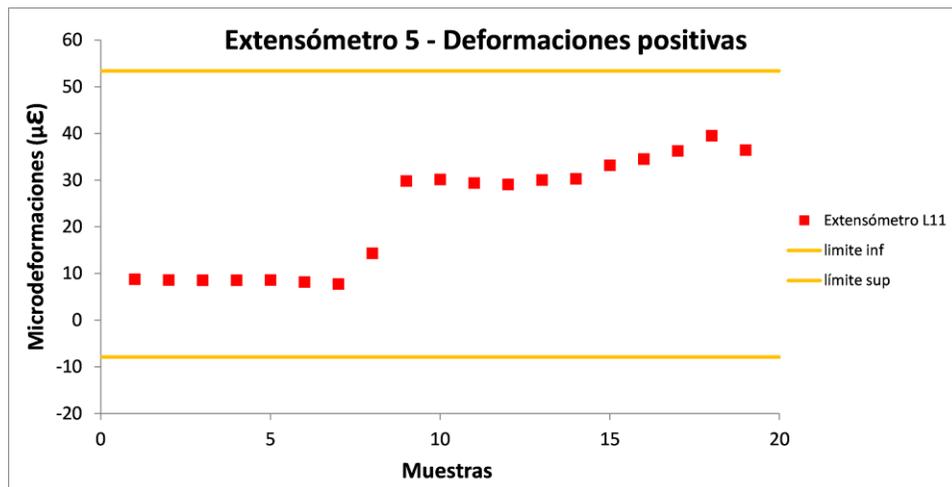


Figura 3.23 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 5.

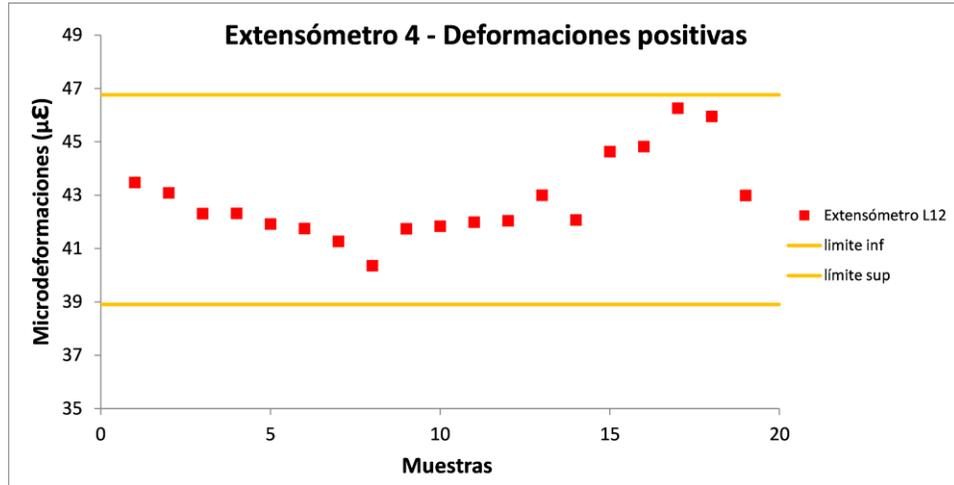


Figura 3.24 Valor de la media asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 4.

Tabla 3.2 Tipo de distribución estadística en los extensómetros para deformación a tensión por carga viva aguas abajo

Extensómetro	Tipo de distribución estadística
15	Log Normal
14	Inversa Gaussiana
13	Pearson 5
11	Pearson 5
10	Log Logistic
9	Inversa Gaussiana
8	Log Normal
6	Inversa Gaussiana
5	Inversa Gaussiana
4	Pearson 5

Fuente: Elaboración propia. 2015

Las gráficas anteriores representan la deformación inicial del sensor cuando un vehículo pasa por el puente, si el puente se encuentra sin tránsito vehicular, los sensores de deformación solo registran la deformación por cambios de temperatura o un valor de deformación acumulado asociado a un cambio originado por un mantenimiento preventivo, este valor es fácil de identificar porque es constante en periodos cortos de tiempo. Cuando un vehículo pasa cercano a un

sensor, éste se deforma primero a tensión, luego a compresión y así sucesivamente hasta regresar al valor constante original sin vehículo. En este segundo bloque de gráficos se presenta los valores a compresión registrados por los sensores de deformación por carga viva. Cabe recordar que todos los valores a tensión o compresión se registran y con éstos se encuentra una distribución estadística caracteriza a cada sensor. Los valores mostrados, por tanto, son el seguimiento de las medias de la carga viva cuando el sensor registra el segundo pico, el cual es un valor a compresión y de menor magnitud al primer pico registrado. Las figuras de la 3.25 a la 3.34 muestran los figuras con el comportamiento de la deformación por carga viva bajo condiciones de operación normal para los sensores 16,18,19, 20, 21, 23, 24, 25, 1 y 3 estos sensores de deformación se encuentran en la viga principal del lado aguas arriba. Las figuras contienen las medias de las cargas vivas a compresión. Mientras que en la tabla 3.3 se puede observar el tipo de distribución estadística que ajusta a cada uno de los sensores mencionados.

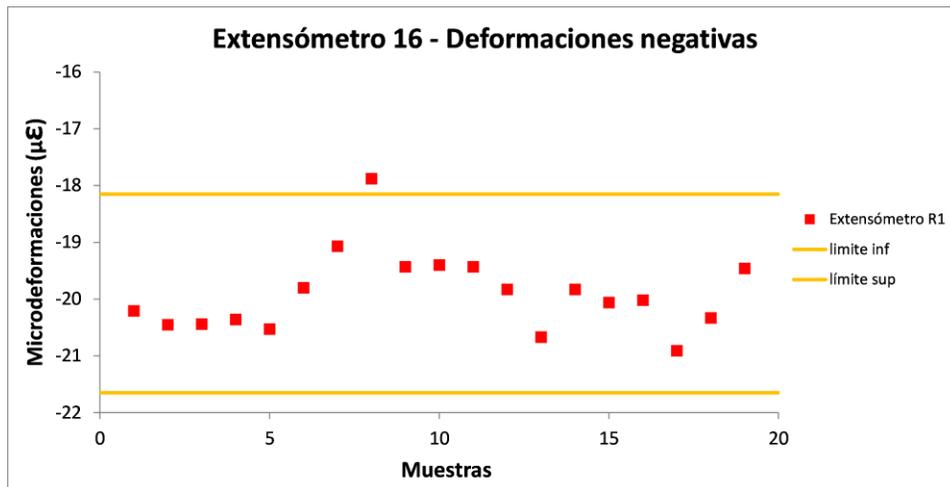


Figura 3.25 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 16.

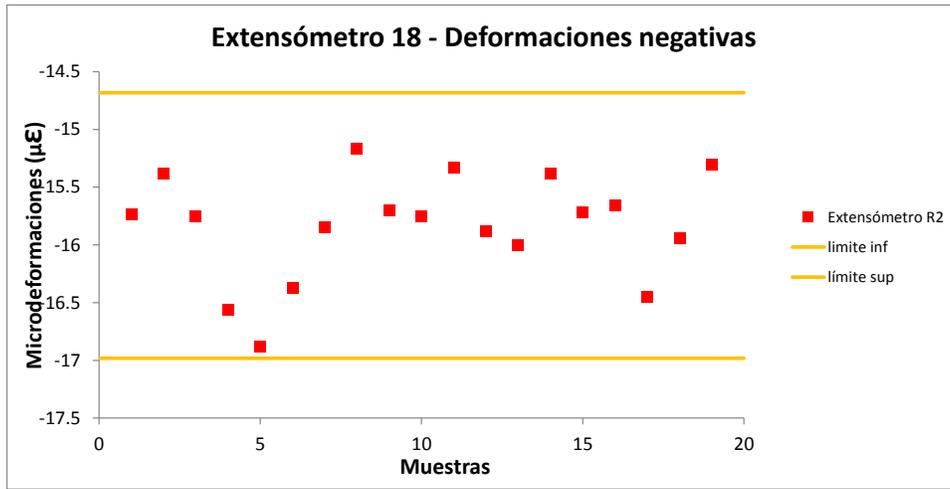


Figura 3.26 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 18.

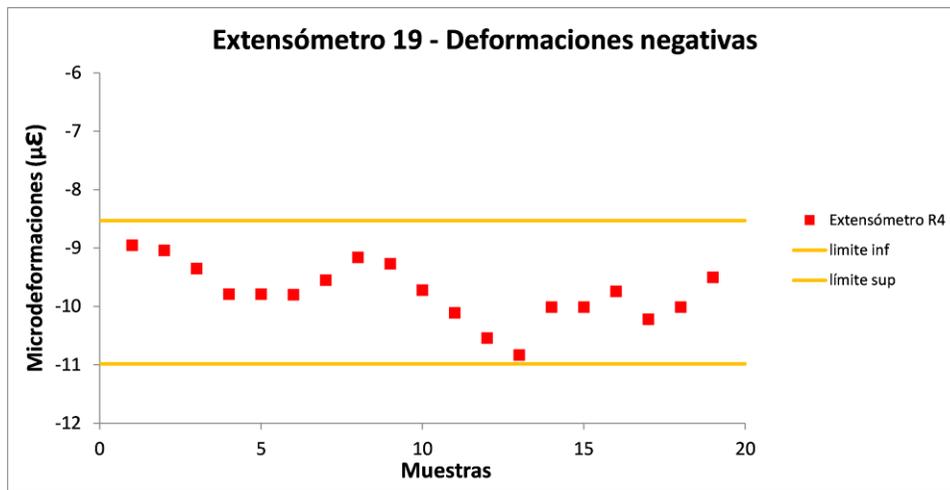


Figura 3.27 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 19.

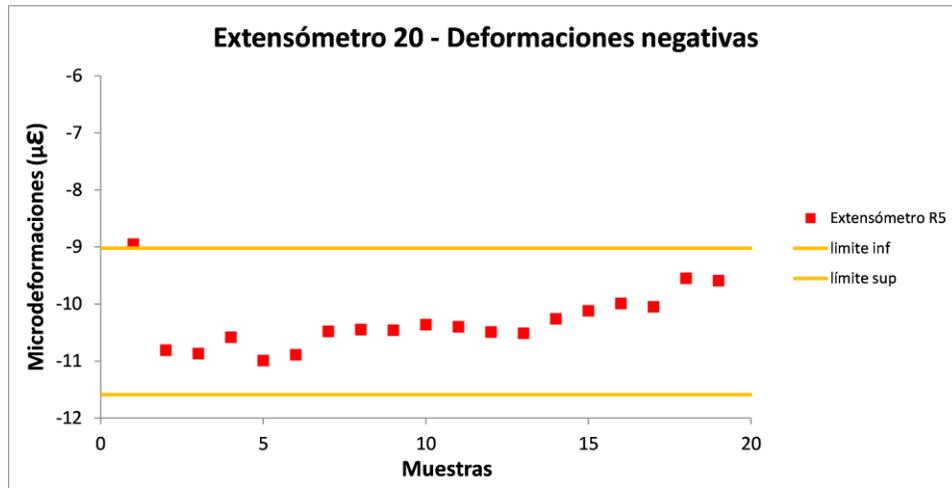


Figura 3.28 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 20.

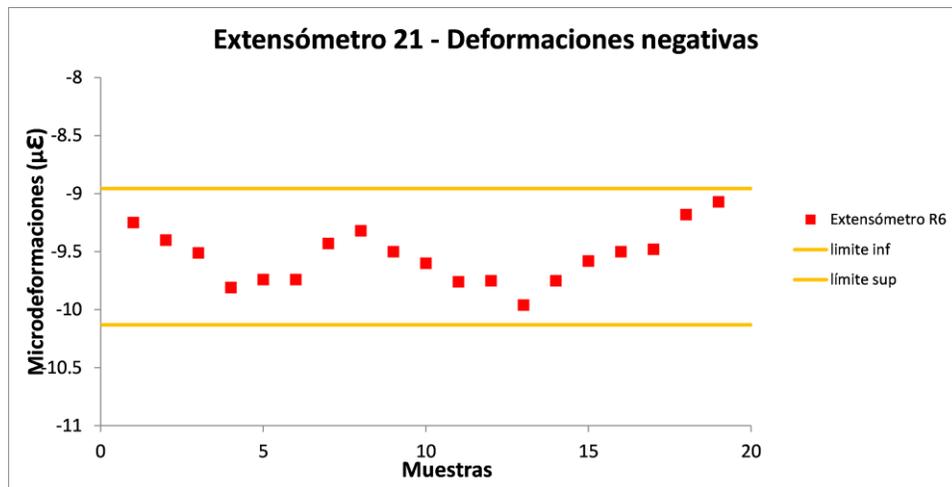


Figura 3.29 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 21.

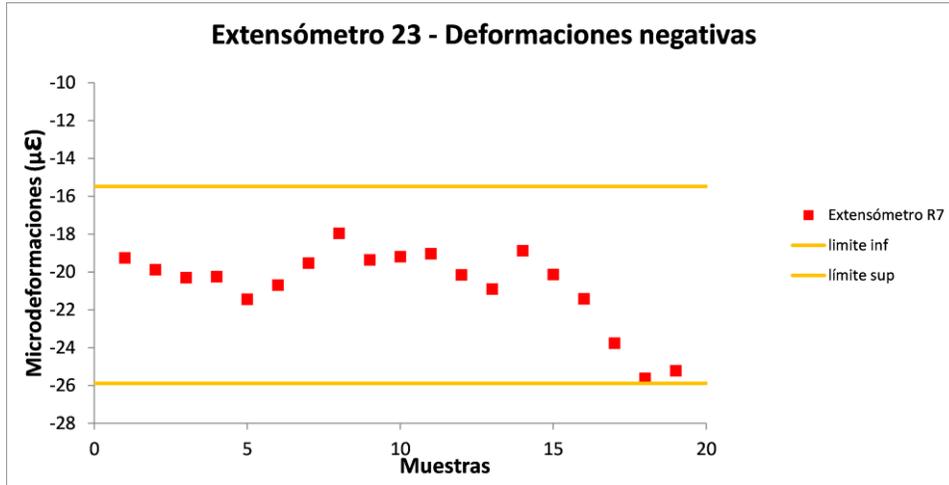


Figura 3.30 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 23.

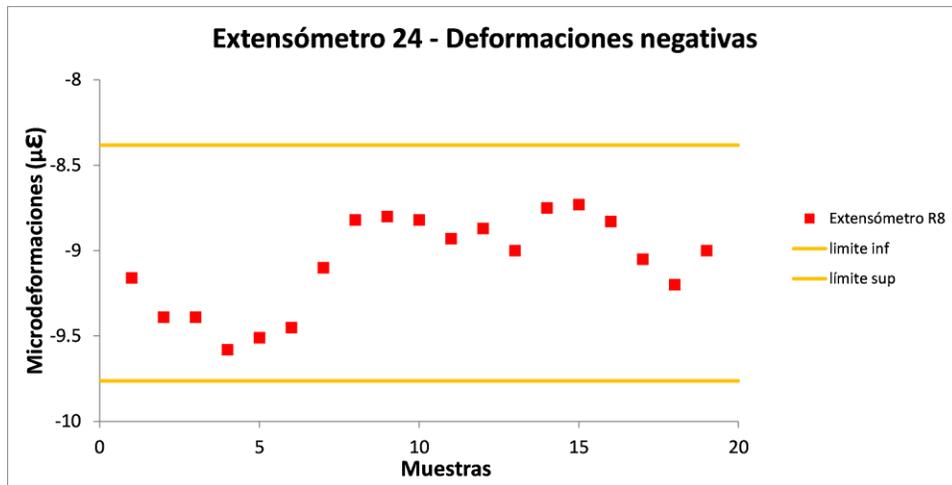


Figura 3.31 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 24.

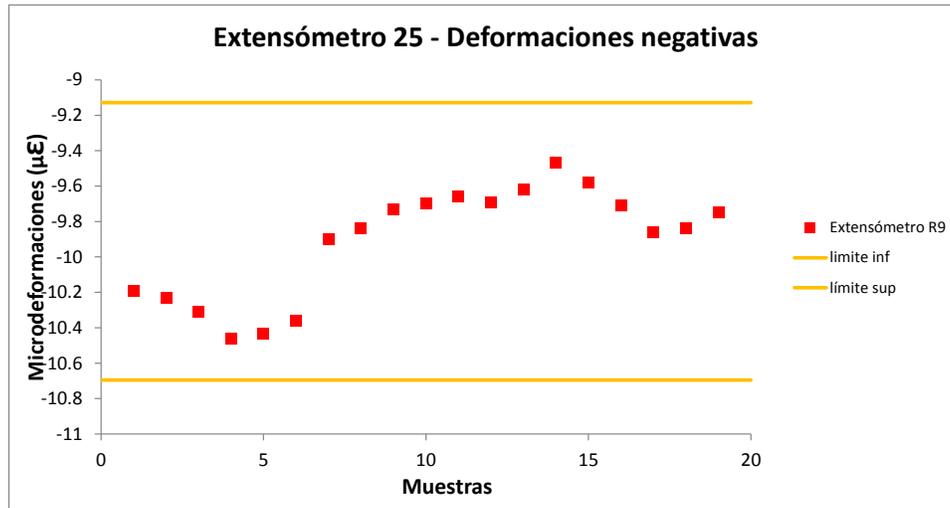


Figura 3.32 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 25.

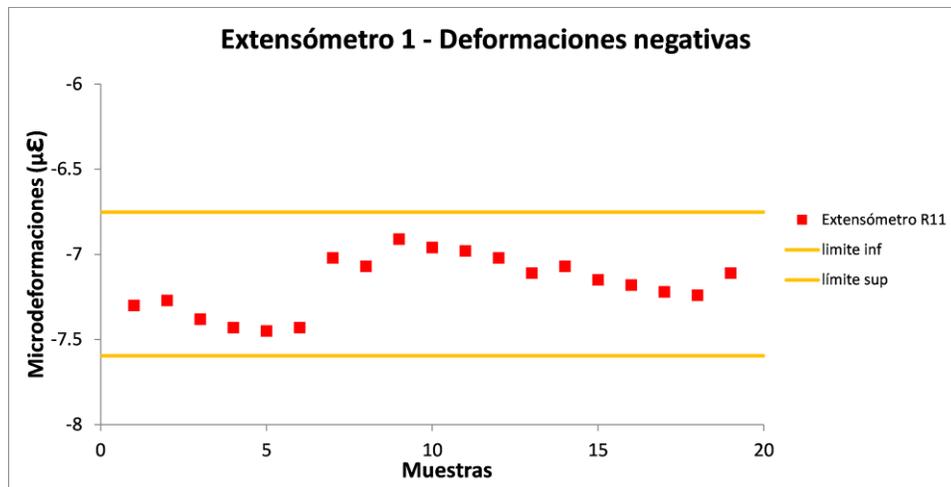


Figura 3.33 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 1.

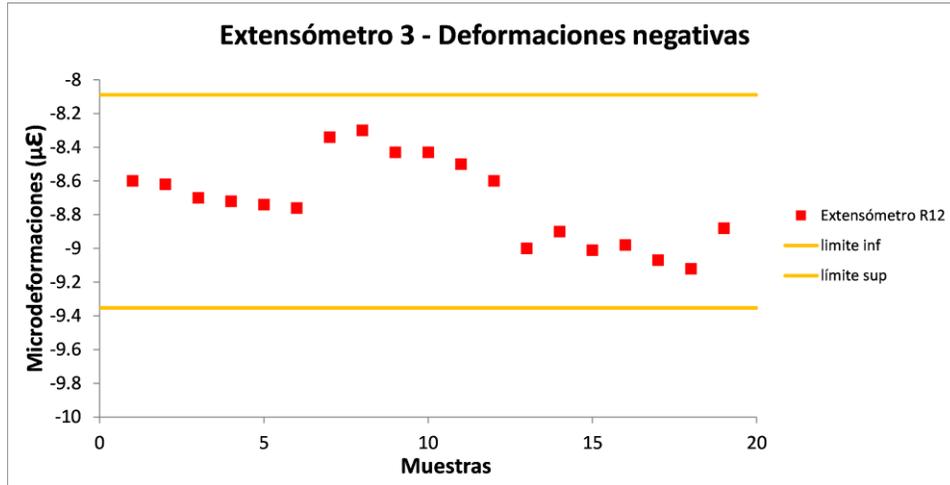


Figura 3.34 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 3.

Tabla 3.3 Tipo de distribución estadística en los extensómetros para deformación a compresión por carga viva aguas arriba.

Extensómetro	Tipo de distribución estadística
16	Normal
18	Logistic
19	Logistic
20	Logistic
21	Logistic
23	Logistic
24	Logistic
25	Logistic
1	Weibull
3	Logistic

Fuente: Elaboración propia. 2015

Las figuras de la 3.35 a la 3.44 muestran los figuras con el comportamiento de la deformación por carga viva bajo condiciones de operación normal para los sensores 15,14, 13, 11, 10, 9, 8, 6, 5 y 4 estos sensores de deformación se encuentran en la viga principal del lado aguas arriba. Las figuras contienen las medias de las cargas vivas a compresión. Mientras que en la tabla 3.4 se puede observar el tipo de distribución estadística que ajusta a cada uno de los sensores mencionados.

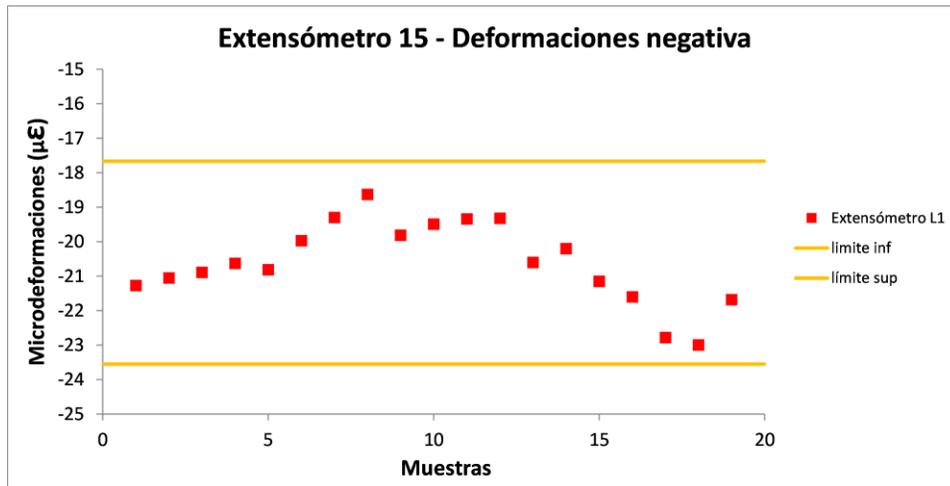


Figura 3.35 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 15.

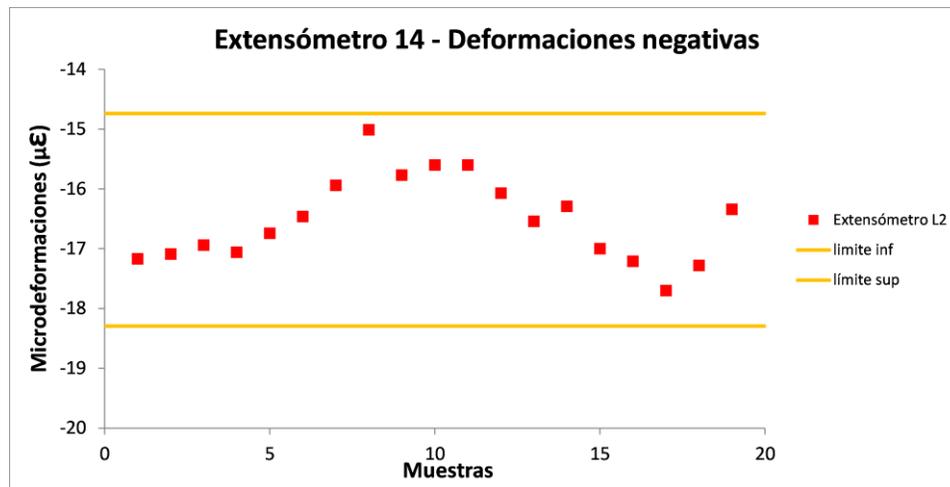


Figura 3.36 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 14.

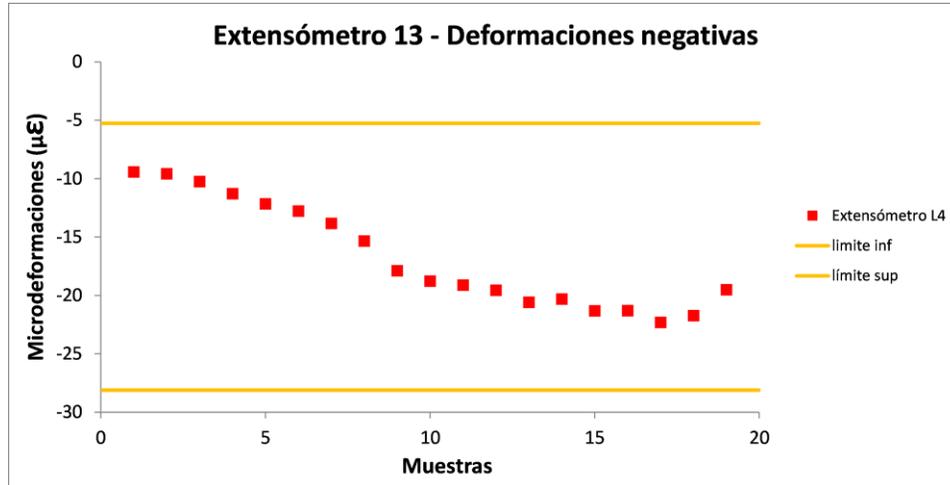


Figura 3.37 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 13.

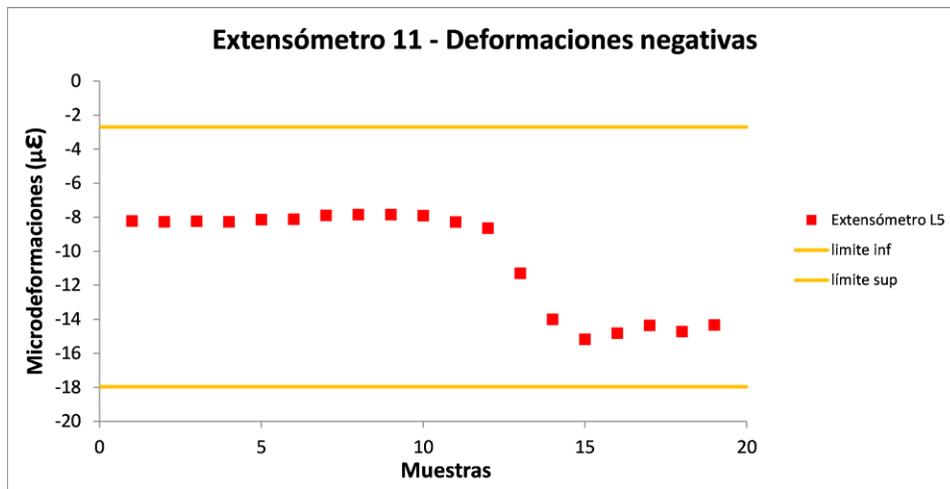


Figura 3.38 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 11.

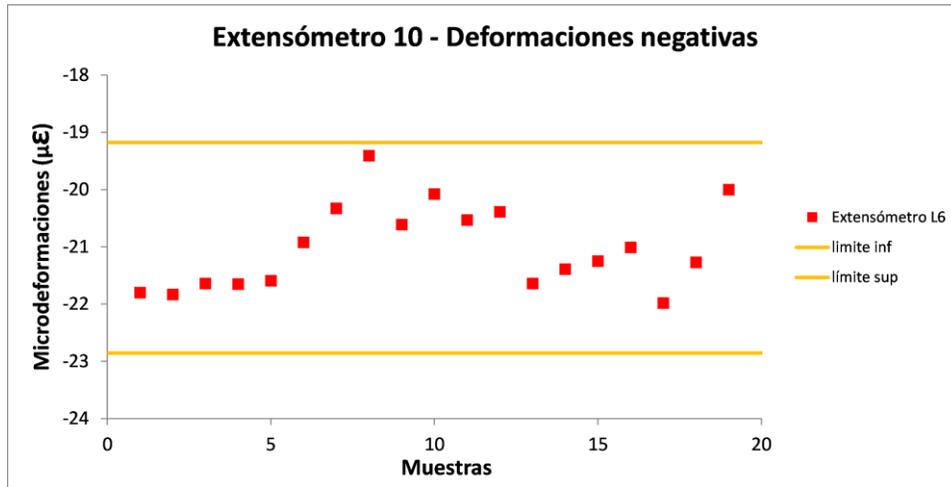


Figura 3.39 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 10.

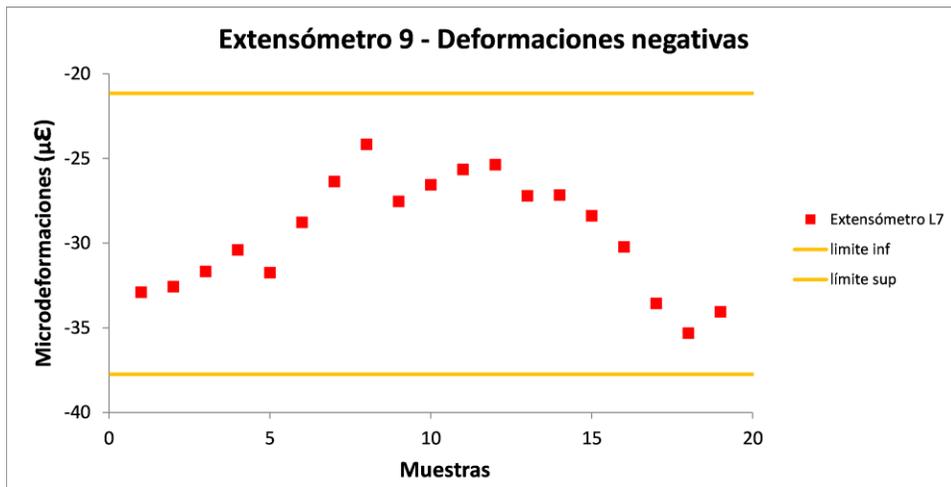


Figura 3.40 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 9.

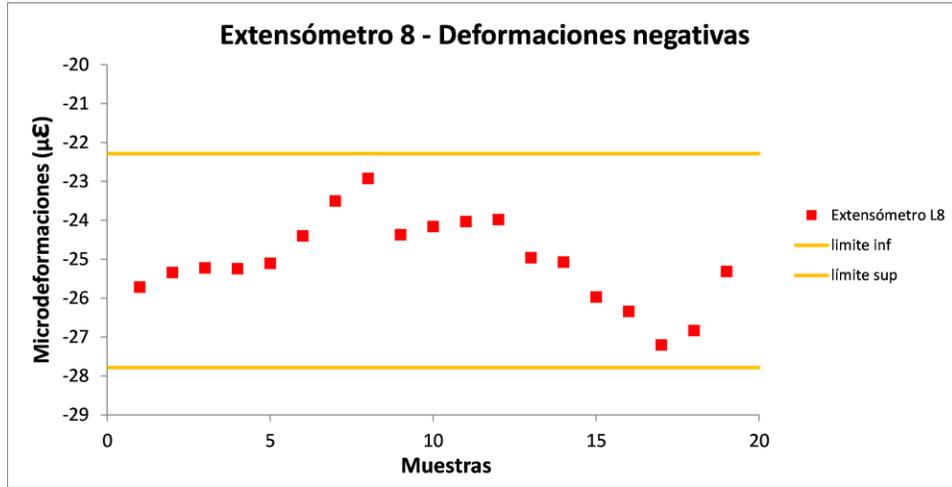


Figura 3.41 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 8.

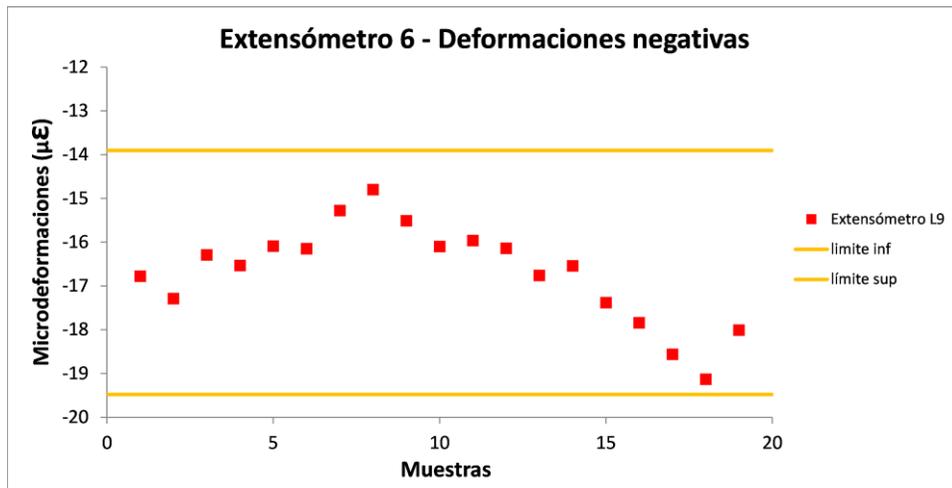


Figura 3.42 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 6.

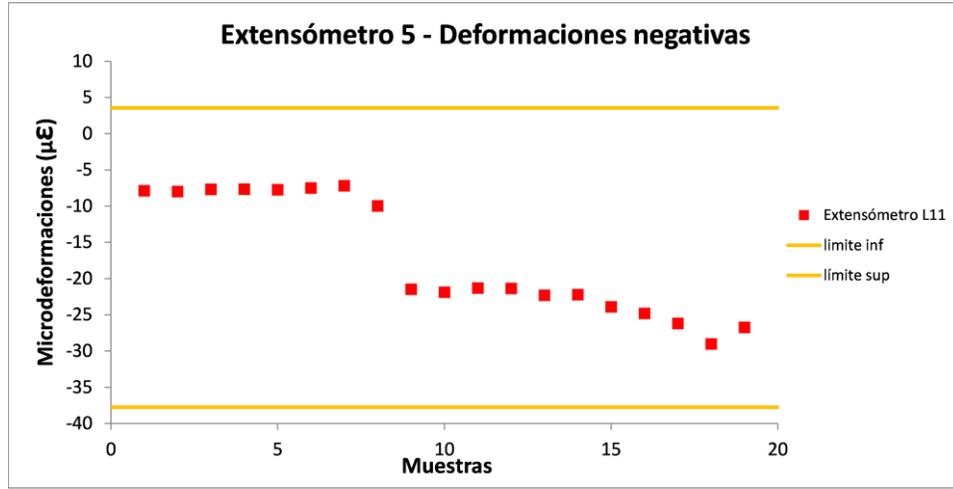


Figura 3.43 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 5.

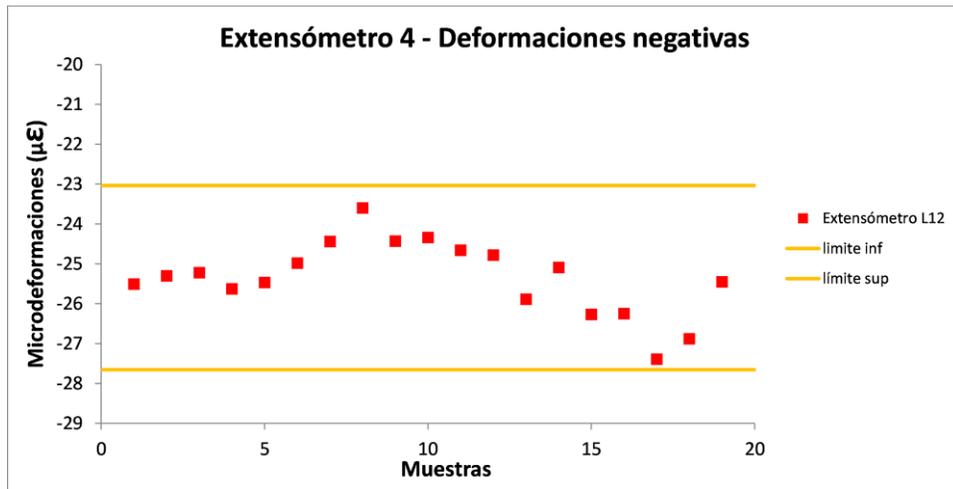


Figura 3.44 Valor de la media a compresión asociada a la deformación por flujo vehicular para el sensor 4.

Tabla 3.4 Tipo de distribución estadística en los extensómetros para deformación a tensión por carga viva aguas abajo.

Extensómetro	Tipo de distribución estadística
15	Logistic
14	Logistic
13	Logistic
11	Logistic
10	Beta general
9	Weibull
8	Logistic
6	Logistic
5	Logistic
4	Weibull

Fuente: Elaboración propia. 2015

La estimación de la tensión en los tirantes de puentes atirantados se puede obtener mediante la medición de la frecuencia natural a partir de un modelo lineal, este modelo es la aproximación más simple para determinar la tensión de un cable (Carrión *et al.*, 2007).

La ecuación 1 describe la vibración libre de un tirante o una cuerda con una masa por unidad de longitud m sujeta a una tensión T :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{m}{T} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

La ecuación 2 muestra la solución de la ecuación diferencial homogénea que describe la frecuencia natural del tirante a través de sus frecuencias naturales:

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (2)$$

Donde n , es el número asociado al modo de vibrar, l es la longitud del cable, T es la tensión del cable y m es la masa por unidad de longitud del cable. La tensión del cable por tanto se obtiene de la ecuación 2 y puede ser dada en función de un solo modo de vibrar o como el promedio de dos o más modos de vibrar del cable. En general, la frecuencia encontrada en cada uno de los tirantes instrumentados corresponde al primer modo de vibración.

La calibración del modelo matemático se realizó utilizando los datos de nivelación de tensiones realizado por la empresa Mexpresa posteriores a la rehabilitación del puente Río Papaloapan en 2009. Los datos de la tensión en los cables son obtenidos de la lectura de un gato hidráulico el cual toma momentáneamente la tensión axial del tirante que se está evaluando, con ello se encuentran las propiedades mecánicas de los tirantes.

En la tabla 3.5 se muestran los parámetros involucrados en la ecuación 2 obtenidos mediante el análisis de las 112 tensiones de los tirantes. Adicionalmente, se incluyen propiedades físicas que permiten determinar la tensión axial de cada tirante instrumentado.

Tabla 3.5 Propiedades mecánicas y físicas de los tirantes.

Propiedad	Magnitud	Unidad
Esfuerzo último del acero	1.864x10 ⁹	Pa
Área efectiva por torón	1.3935x10 ⁻⁴	m ²
Masa por unidad de longitud de un torón	1.2291	kg/m
Longitud del tirante 4	37.55	m
Longitud del tirante 11	86.59	m
N° torones en el tirante 4	19	elementos
N° torones en el tirante 11	28	elementos

Fuente: Elaboración propia. 2015

Para la evaluación de la tensión en los tirantes no es indispensable la aplicación de un modelo no lineal, ya que los efectos no lineales que sufren los tirantes tienen un error cercano al 1% de la tensión axial en los mismos (Carrión et al., 2005).

Para obtener la frecuencia natural a partir de la respuesta dinámica de los acelerómetros, ésta se pasa del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia cuando se aplica la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés), este proceso se automatiza a través de un programa desarrollado en LabVIEW que encuentra la frecuencia natural de vibración de cada tirante por cada bloque de datos de 2 minutos. El programa busca las frecuencias con mayor amplitud dentro de un rango de frecuencias definido a través datos experimentales previos y omite aquellas amplitudes de frecuencias que se encuentre debajo de 7 desviaciones estándar con respecto a la media de amplitudes de frecuencias.

En la figura 3.45 se muestra el análisis de frecuencia del acelerómetro instalado en el tirante 4 de la semi-arpa 1, se observa que el primer modo de vibrar es predominante y se encuentra a 3.3 Hz. Las líneas verticales en color morado son el umbral en donde el sistema busca la mayor amplitud de frecuencia, mientras que la línea horizontal en color azul representa al límite de amplitudes de frecuencias que son omitidas.

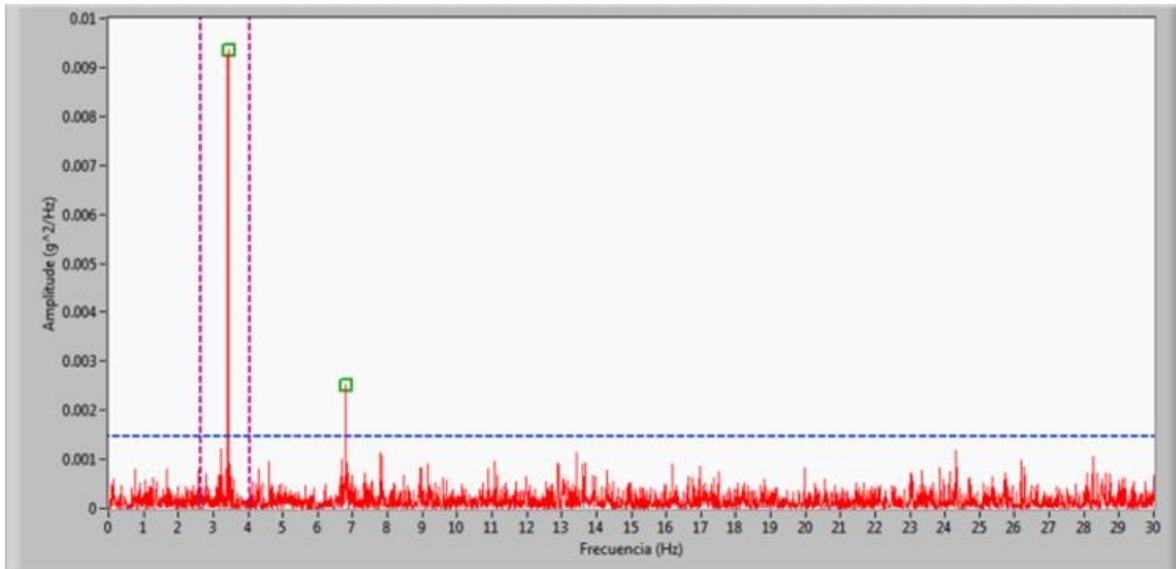


Figura 3.45 Análisis de frecuencia al tirante 4 de semi-arpa 1

Una vez encontrada la frecuencia natural de vibración, la tensión axial se calcula en el tirante empleando las propiedades mecánicas y físicas que se muestran en la Tabla 3.5 en conjunto con la ecuación 2.

Los datos de tensión axial acumulados en periodos de 15 días consecutivos se introducen al programa @Risk para ajustarlos a una distribución estadística que describe el comportamiento del tirante, además se obtiene la media y la desviación estándar de cada conjunto de datos.

En algunas ocasiones la distribución estadística de cada bloque de 15 días de información no se ajusta como primera opción al mismo tipo de distribución. Por lo cual se decidió emplear el criterio del menor error chi-cuadrado para elegir la distribución que representa el comportamiento del tirante en todos los bloques de datos de 15 días acumulados.

En la figura 3.46 se muestra el ajuste de la tensión axial en el tirante 4 de la semi-arpa 1 correspondiente a la primera quincena de junio de 2013. Se observa que el conjunto de datos se ajusta a una función de distribución Log-logística con tensión axial media de 1533.15 kN.

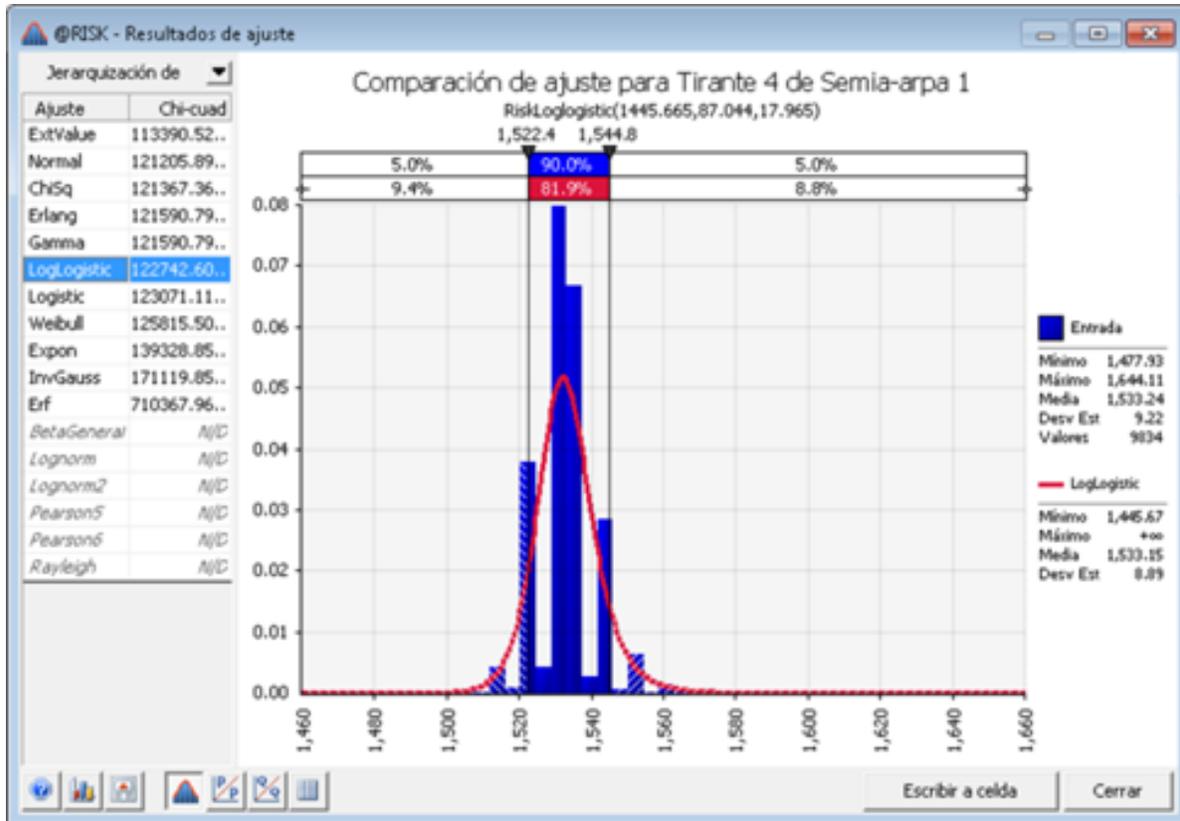


Figura 3.46 Ajuste de distribución del tirante 4 semi-arpa 1

En total se tienen 40 bloques de datos de 15 días, los cuales comprenden el periodo de junio 2013 a marzo 2015, siendo estos datos resultado de los primeros años de información del monitoreo. En la tabla 3.6 se muestra la elección de distribución estadística que se ajustó a cada uno de los 16 tirantes instrumentados para este lapso.

Al asociar una única distribución a cada tirante instrumentado se puede obtener el comportamiento en el tiempo del valor medio de la tensión axial en el tirante y, con ello, establecer los límites normales de operación en cada uno. En el anexo 1 se presenta el comportamiento histórico de la tensión axial media de los 16 tirantes instrumentados con acelerómetros, generado a partir de 40 bloques de datos, siendo cada bloque el resumen de información de 15 días de monitoreo. Para determinar los límites inferior y superior en cada tirante, se calculó la media de los 20 valores de tensión y, a partir de ± 2.5 desviaciones estándar, se fijaron los límites normales de operación.

Tabla 3.6 Distribución estadística para los tirantes instrumentados.

Semi-arpa	Tirante 4	Tirante 11
1	Log-logística	Logística
2	Logística	Normal
3	Logística	Normal
4	Logística	Logística
5	Logística	Log-logística
6	Logística	Logística
7	Log-logística	Logística
8	Logística	Log-logística

Fuente: Elaboración propia. 2015

Como resultado del análisis realizado del comportamiento de la tensión axial de los 16 tirantes, con sus respectivos límites de operación normal, se observó un incremento en la tensión de los tirantes provocados por trabajos de reencarpetamiento asfáltico sobre el puente. Cabe mencionar que la media de la tensión en cada tirante instrumentado del puente se incrementó 1% por carga muerta después del reencarpetamiento, lo que provocó que se modificaran los límites normales de operación.

4 Estrategias de monitoreo globales

Para el seguimiento de los índices globales del puente Río Papaloapan se han diseñado los siguientes tipos de análisis, el primero consiste en analizar el patrón de deformación del puente a través de los sensores de deformación colocados sobre las vigas principales del puente, tanto por temperatura como por carga viva, la figura 4.1, muestra el perfil de deformación después de un año de monitoreo para los sensores de deformación colocados sobre la viga principal del lado aguas abajo y la figura 4.2 corresponde a los sensores de deformación del lado aguas arriba, ambos asociados a cargas vivas por flujo vehicular.

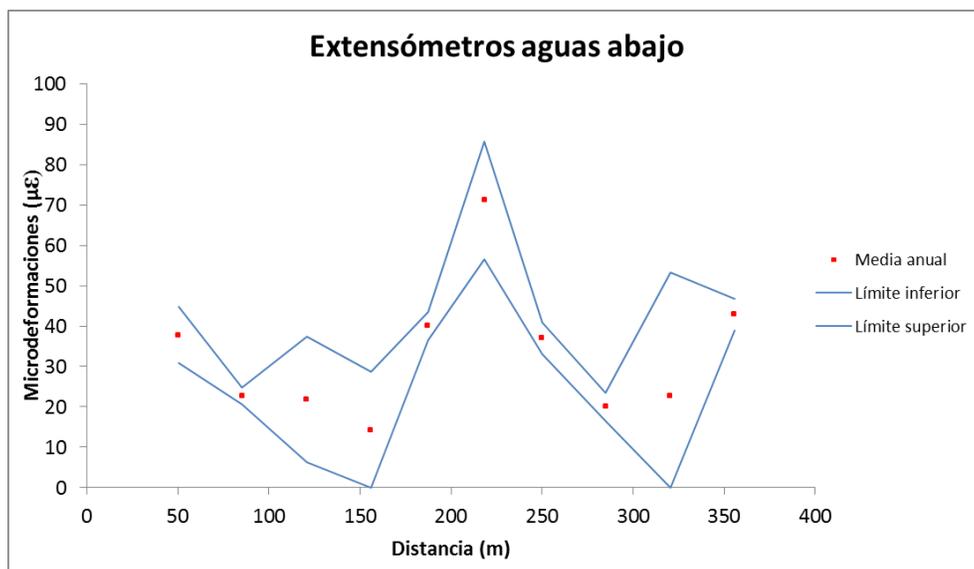


Figura 4.1 Deformación bajo condiciones de operación normal de los extensómetros en viga principal lado aguas abajo.

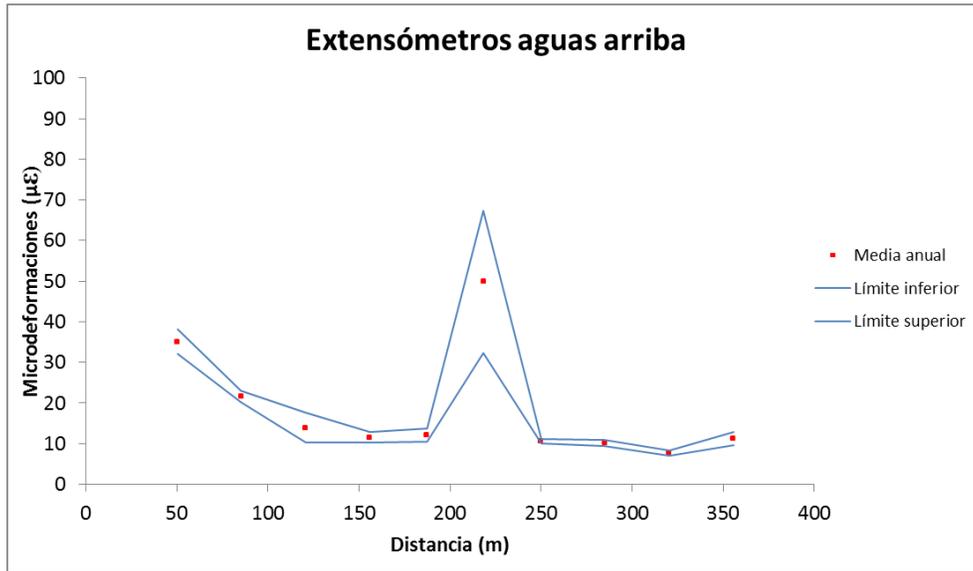


Figura 4.2 Deformación bajo condiciones de operación normal de los extensómetros en viga principal lado aguas arriba.

En la figura 4.3 se graficó la deformación registrada a 29°C para los sensores de deformación ubicados en la viga principal del lado aguas arriba. Para obtener este valor de deformación se filtran los datos de los sensores para eliminar la deformación provocada por el flujo vehicular. En la figura se observa que el patrón de deformación se repite en las mediciones, sin embargo, existe mucha dispersión principalmente por tres factores: el primero, se debe a que actualmente solo se ocupa la información de un sensor de temperatura colocado debajo del tablero del puente como referencia. El segundo, actualmente no se está considerando la humedad ambiental y, el tercero, tampoco se ha correlacionado con la velocidad del viento. Para minimizar la dispersión de la información se realizará un análisis de sensibilidad sobre las variables de humedad, velocidad del viento y temperatura ambiental. La comparación del perfil de deformación se analizará cuando las cuatro variables se encuentren dentro de un rango de valores determinado a partir del estudio de sensibilidad.

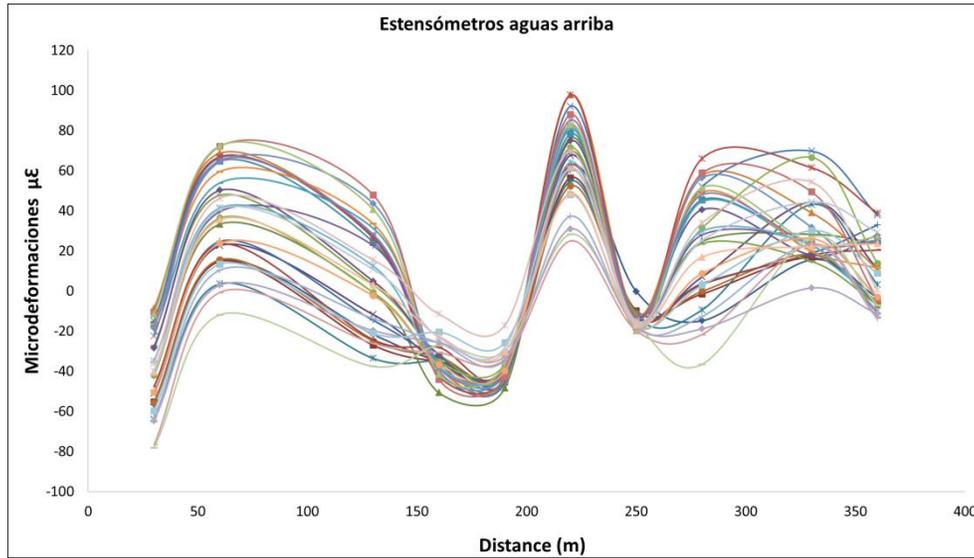


Figura 4.3 Deformación de los extensómetros por temperatura en viga principal lado aguas arriba.

El último análisis global corresponde al cálculo de las frecuencias y modos de vibrar del puente Río Papaloapan a partir de la respuesta dinámica de los extensómetros en las dos vigas principales, de los datos analizados se ha detectado el primer modo de vibrar del puente (figura 4.4), el cual tiene un valor de frecuencia natural de 0.116 Hz.

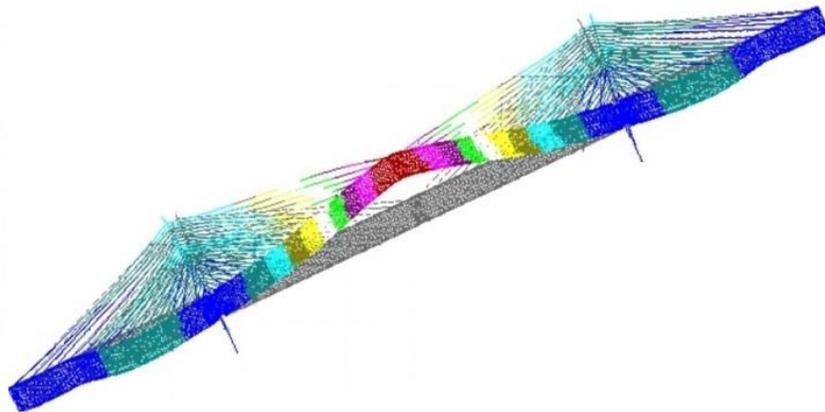


Figura 4.4 Primer modo de vibrar del puente Río Papaloapan.

5 Estrategias de monitoreo de predicción e históricas.

El último grupo en las estrategias de monitoreo corresponde a la predicción y el análisis del comportamiento estructural del puente ante eventos extraordinarios. Los estudios de simulación Monte Carlo son uno de los análisis empleados para la predicción del comportamiento de las líneas de tendencia de la deformación en los extensómetros de las vigas principales por incremento de flujo vehicular. En la figura 5.1 se observan los valores de las medias de las distribuciones estadísticas generadas por un modelo de elemento finito en las posiciones de los extensómetros en las vigas principales con las condiciones de tráfico actual. Al realizar la comparación de los datos del monitoreo se puede observar que es necesario refinar la calibración del modelo de elemento para poder establecer las tendencias de la deformación por carga viva de los extensómetros, por lo que se ha planeado una actualización del modelo utilizando algoritmos genéticos.

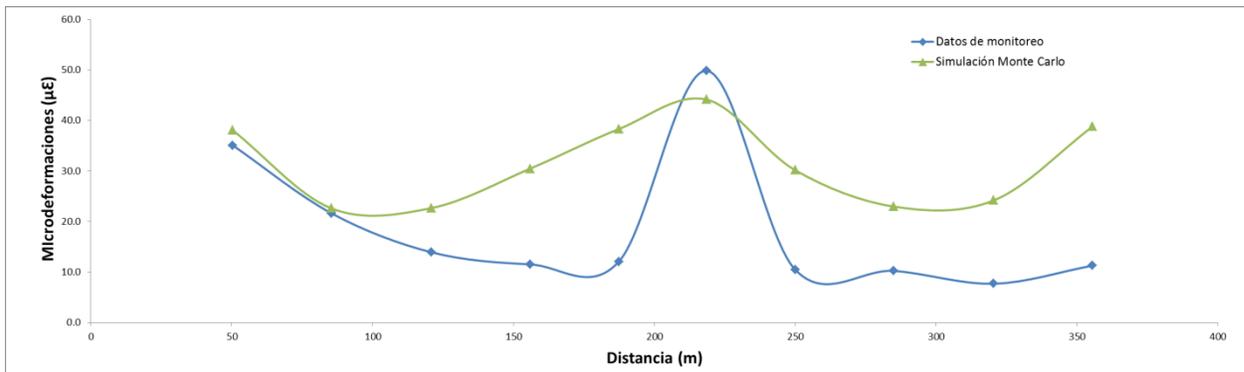


Figura 5.1 Valor de la media por flujo vehicular obtenidos a partir de simulación Monte Carlo.

5 Conclusiones

De la información analizada a un año de monitoreo del puente Río Papaloapan se ha establecido las alarmas de comportamiento estructural bajo condiciones normales de operación para las estrategias locales y globales, aún es necesario establecer límites con respecto a valores de diseño de los elementos estructurales, límites de servicio del puente y esfuerzo último de los materiales, los cuales serán calculados a partir de la actualización del modelo de elemento finito.

Se ha detectado de la evaluación de grupos de extensómetros, una deformación mayor en el centro del claro en la dirección este, a la altura del tirante 11 de las semi arpas 2 y 7, la zona coincide con la ubicación de la falla del elemento de sujeción que fue remplazado. Se ha planteado la posibilidad de que exista daño en los elementos estructurales del tablero de esta región por lo que se realizarán pruebas dinámicas controladas en combinación con métodos de detección de daño para conocer el estado estructural en esa zona del puente.

La actualización de la calibración del modelo de elemento finito será utilizada para calcular los límites de alarma de servicio y diseño, establecer líneas de tendencia del comportamiento estructural por incremento en el tránsito vehicular, realizar estudios de prognosis e implementar métodos de detección de daño con información del monitoreo remoto.

Bibliografía

Carrión F. J., Hernández J. R., Terán J., 2005, “Estudio experimental de un puente atirantado”. Publicación Técnica No 255 (pp. 21, 34, 54-55).

Carrión F. J., López J. A., Quintana J. A., Lozano A., 2007, “Nonlinear Assessment of Cable Vibration in a Stayed Bridge”, *Experimental Mechanics*.

Doyle J. F., 1991, “Static and Dynamic analysis of structures”, Kluwer academic publishers, Netherlands.

López J. A., Carrión F. J., Quintana J. A., Samayoa D., Lomelí M. G., Orozco P. R., (2009), “Verification of the Ultrasonic Qualification for Structural Integrity of partially Embedded Steel Elements”, *Advances Materials Research*, pp. 69-78.

Quintana J.A., Carrión F.J., Crespo S.E., 2013, “Strategies for assessing the Rio Papaloapan bridge structural integrity”, *The 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Hong Kong.

Anexo 1 Histórico de tensiones del puente Río Papaloapan

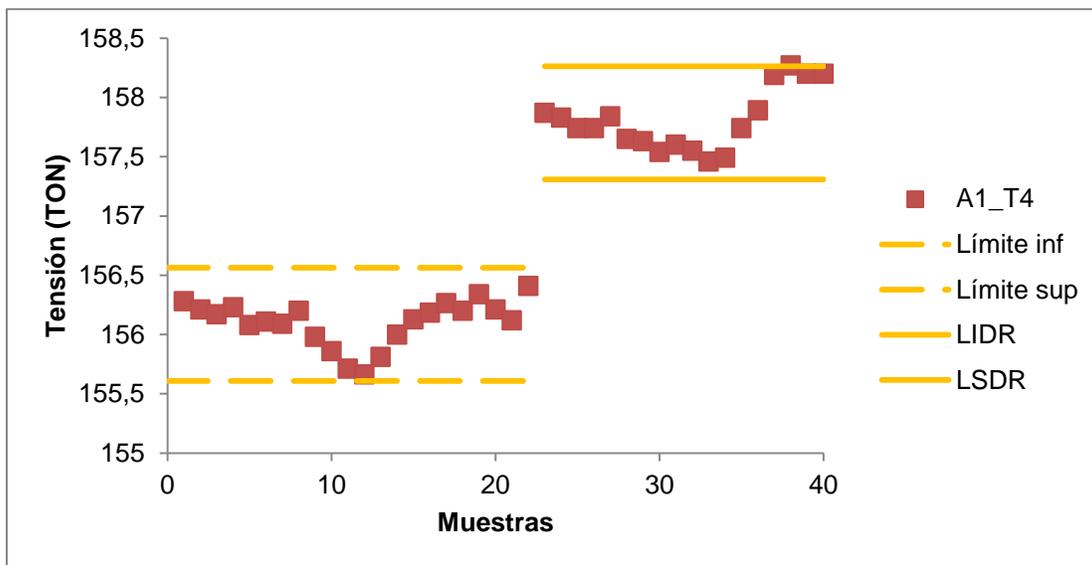


Figura A1.1 Semiarpa 1 – Tirante 4

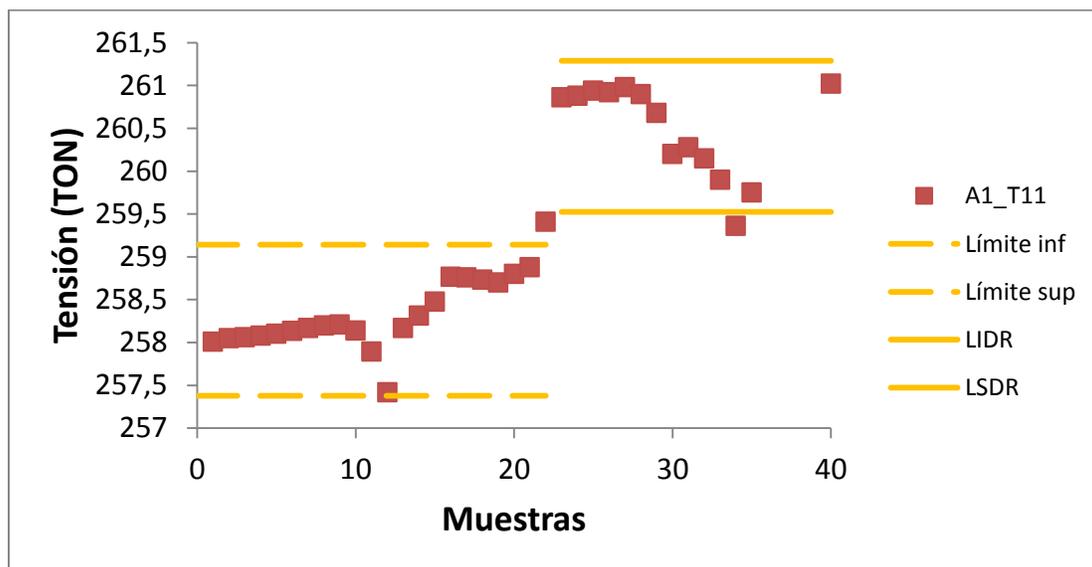


Figura A1.2. Semiarpa 1 – Tirante 11. El sensor presentó corrimiento en su longitud de onda nominal causando que se perdiera de los límites en Enlight y no registrara datos. Los bloques de datos afectados son: el último par correspondientes a marzo 2015

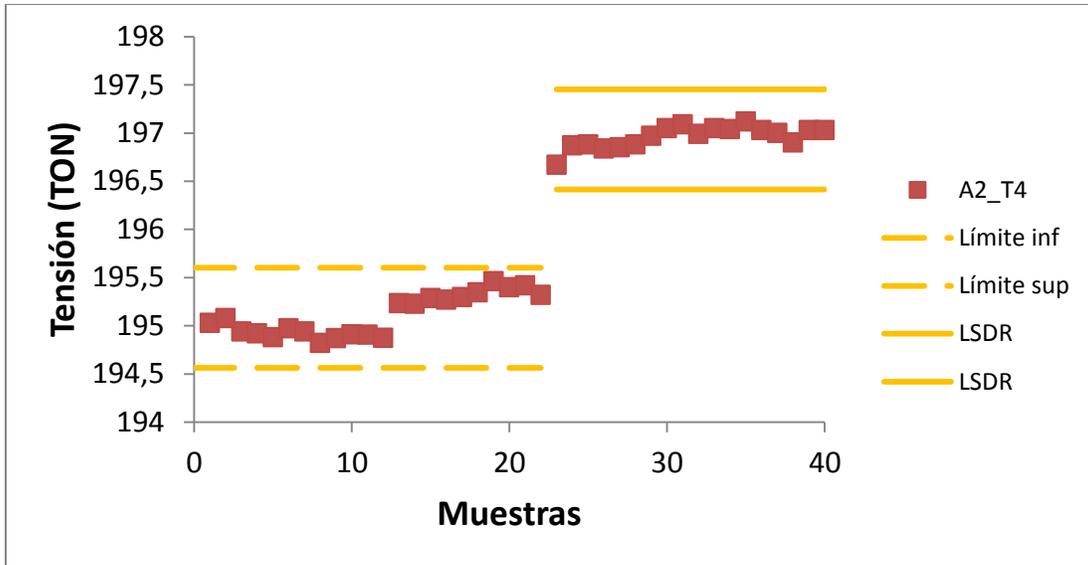


Figura A1.3 Semiarpa 2 - Tirante 4

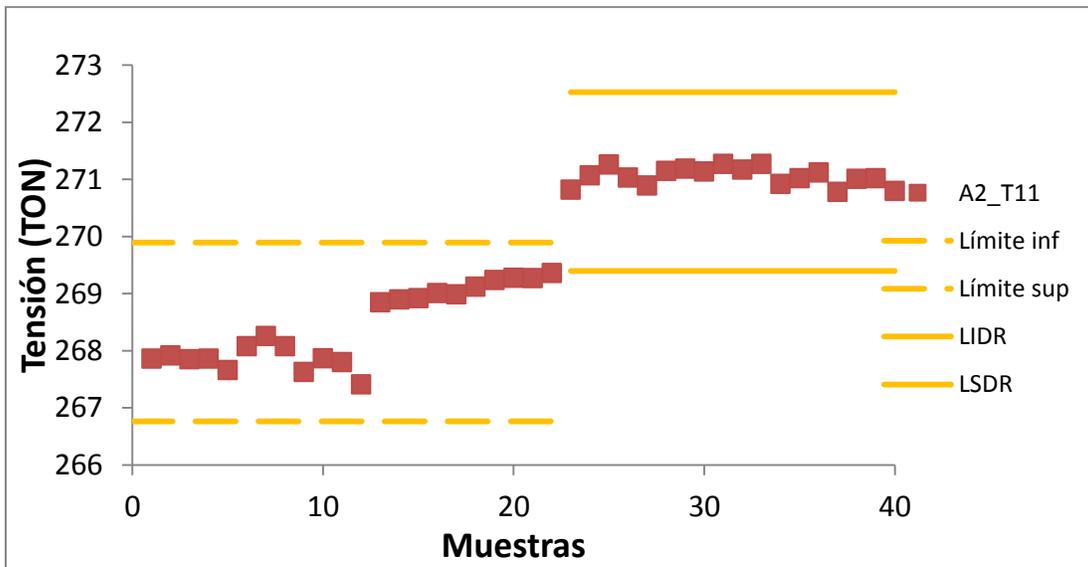


Figura A1.4 Semiarpa 2 - Tirante 11

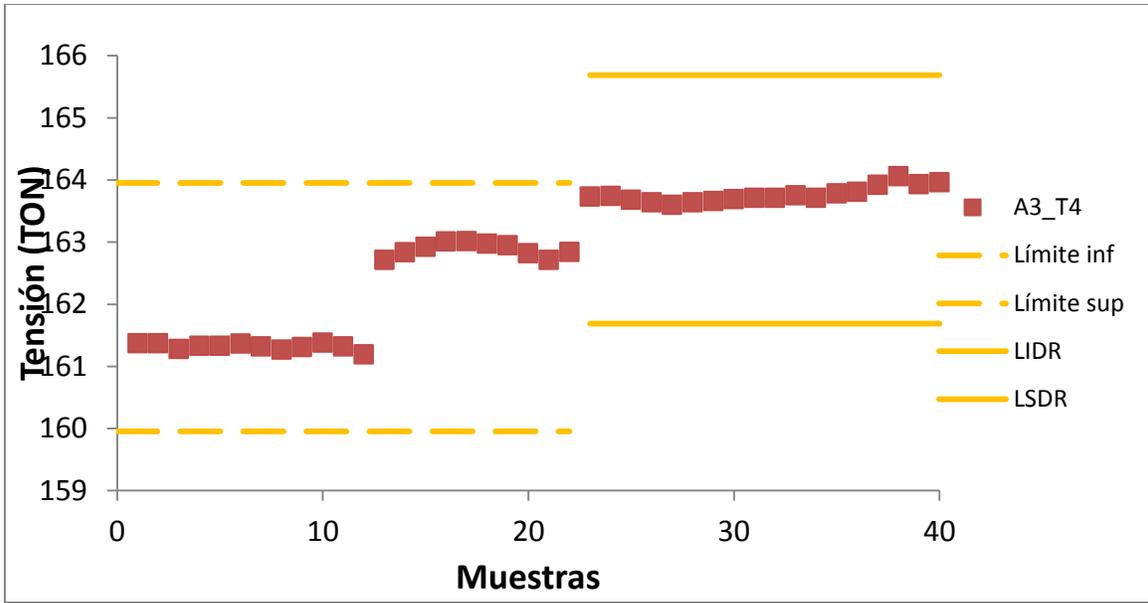


Figura A1.5 Semiarpas 3 - Tirante 4

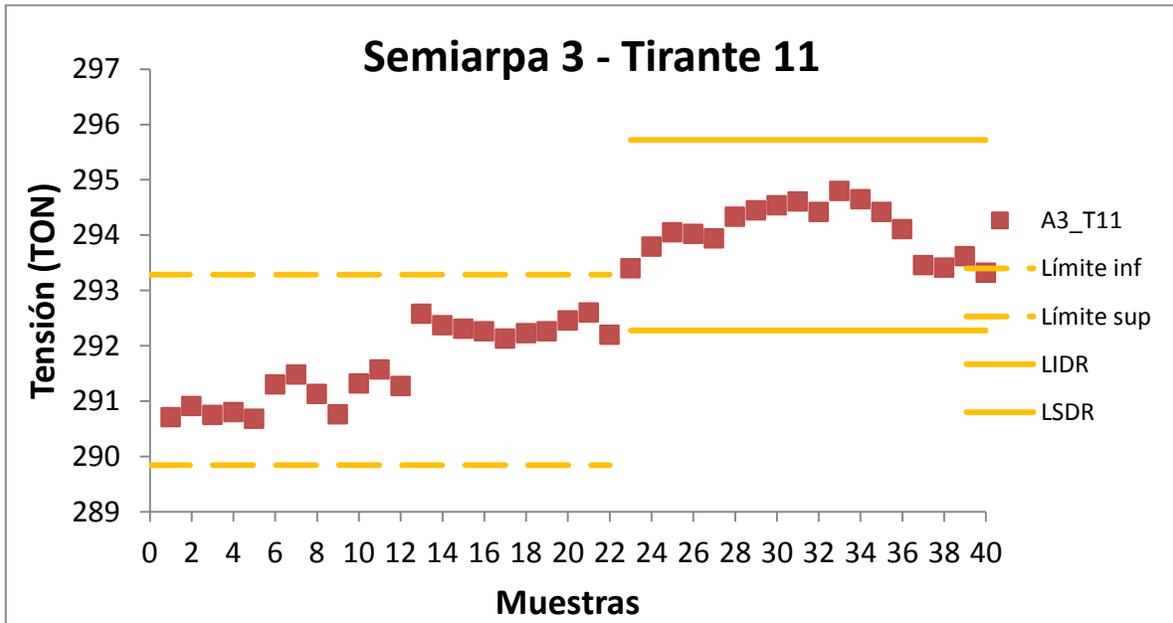


Figura A1.6 Semiarpas 3 - Tirante 11

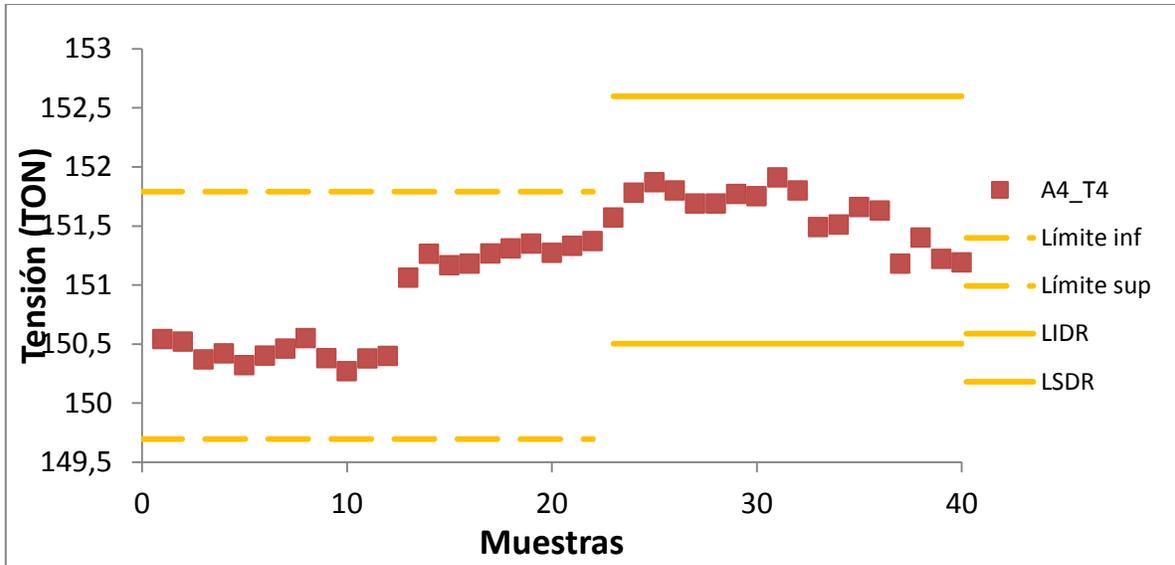


Figura A1.7 Semiarpa 4 - Tirante 4

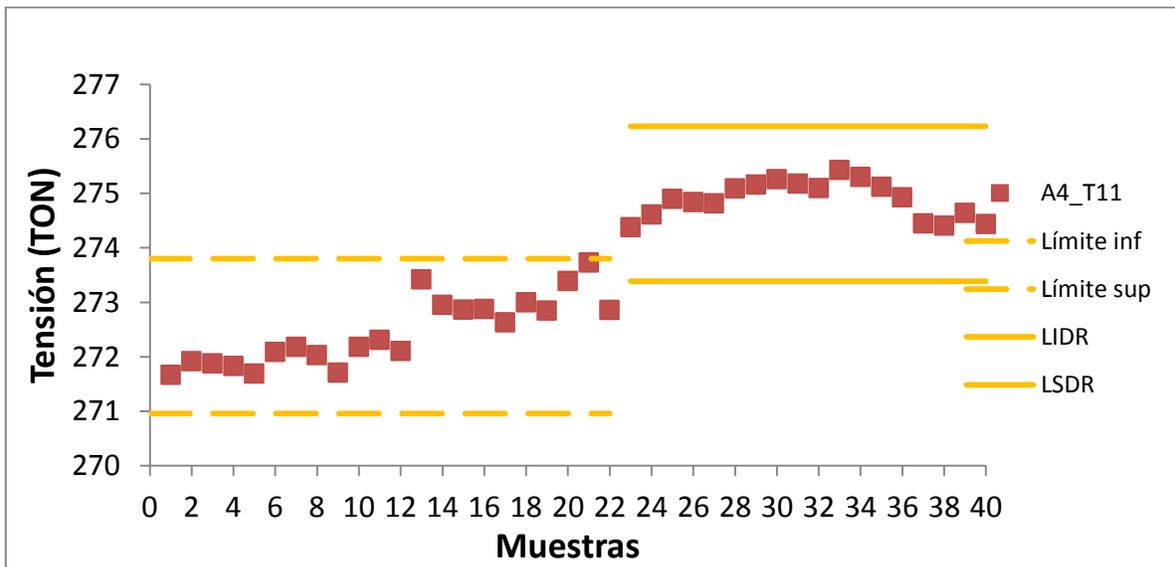


Figura A1.8 Semiarpa 4 - Tirante 11

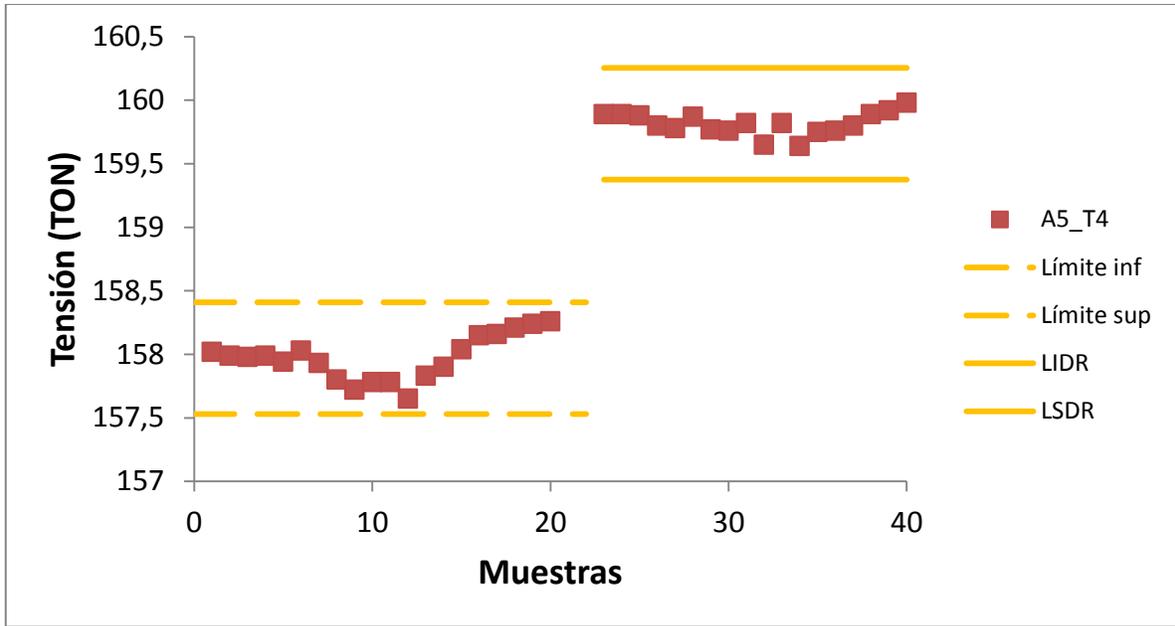


Figura A1.9 Semiarpa 5 - Tirante 4

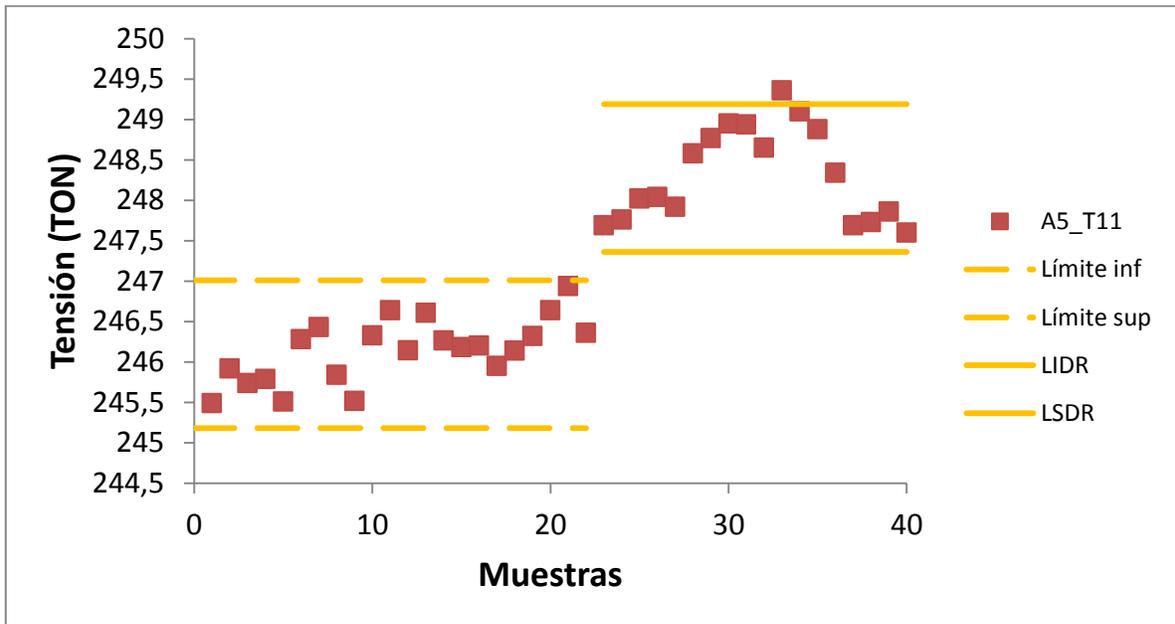


Figura A1.10 Semiarpa 5 - Tirante 11

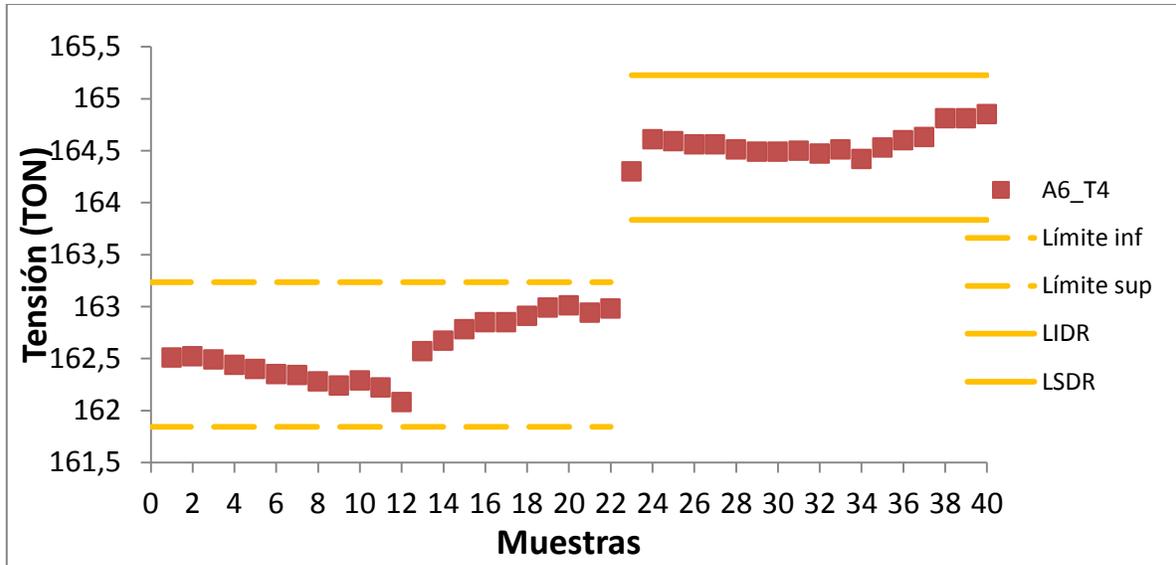


Figura A1.11 Semiarpa 6 - Tirante 4

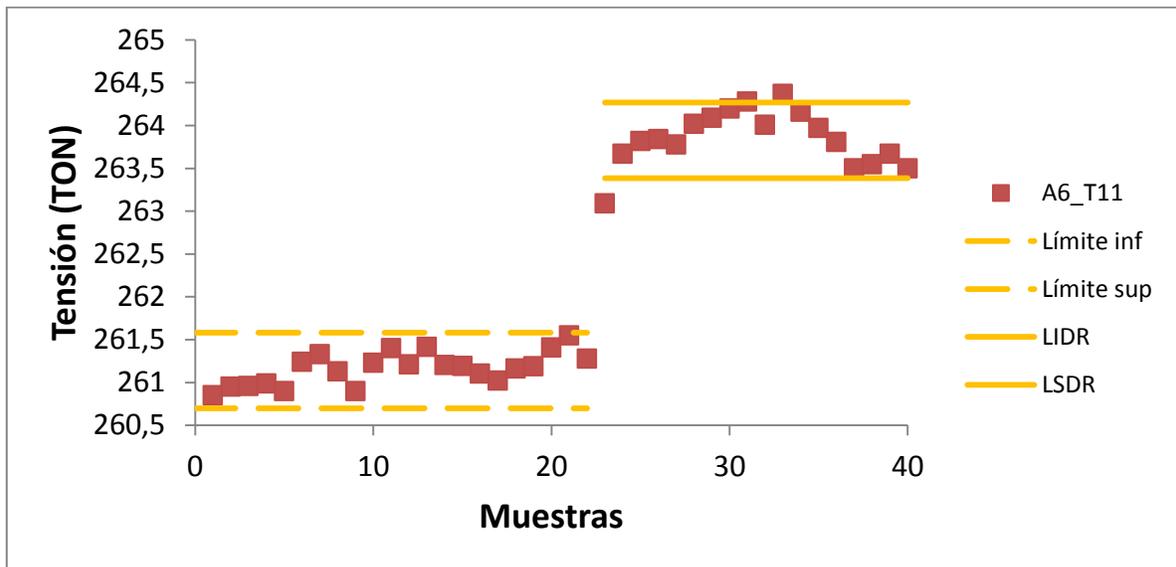


Figura A1.12 Semiarpa 6 - Tirante 11

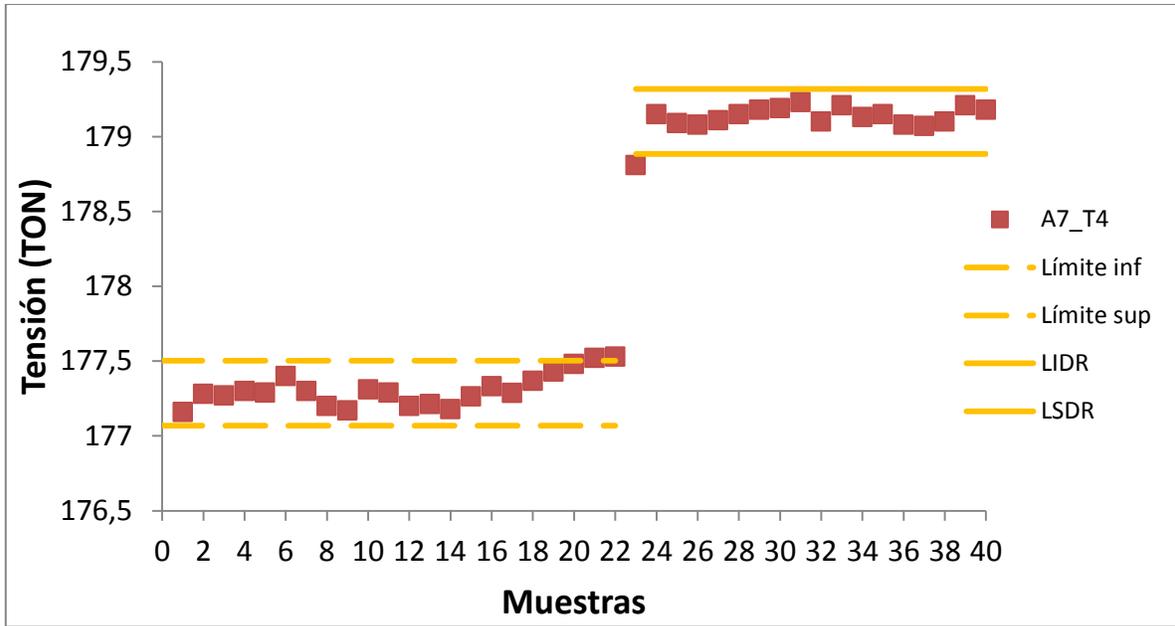


Figura A1.13 Semiarpa 7 - Tirante 4

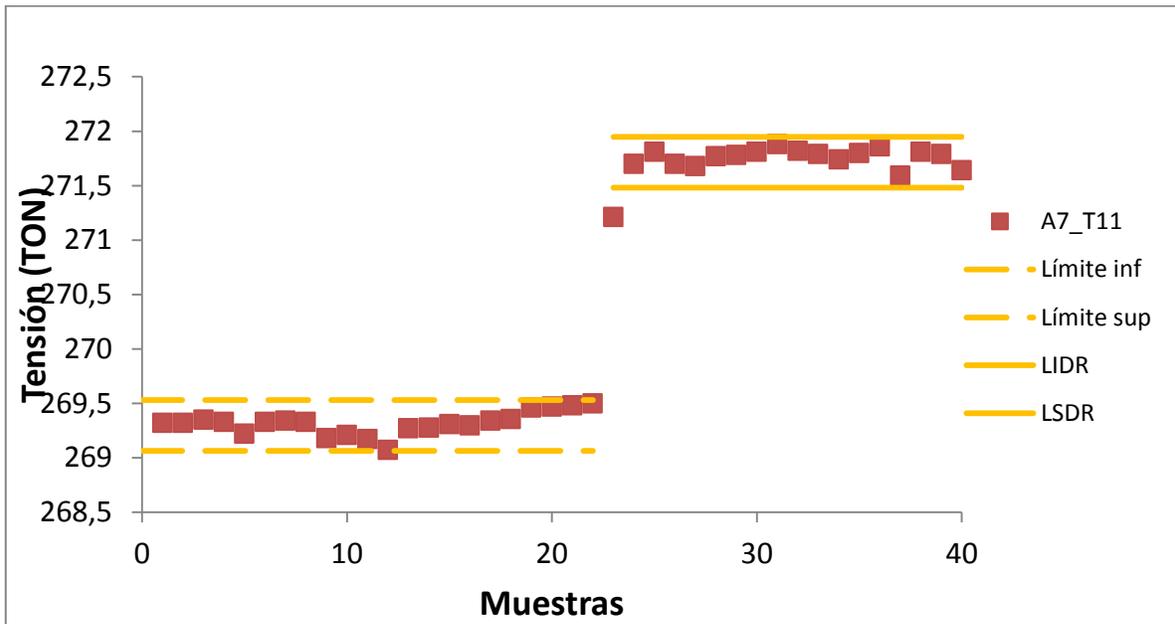


Figura A1.14 Semiarpa 7 - Tirante 11

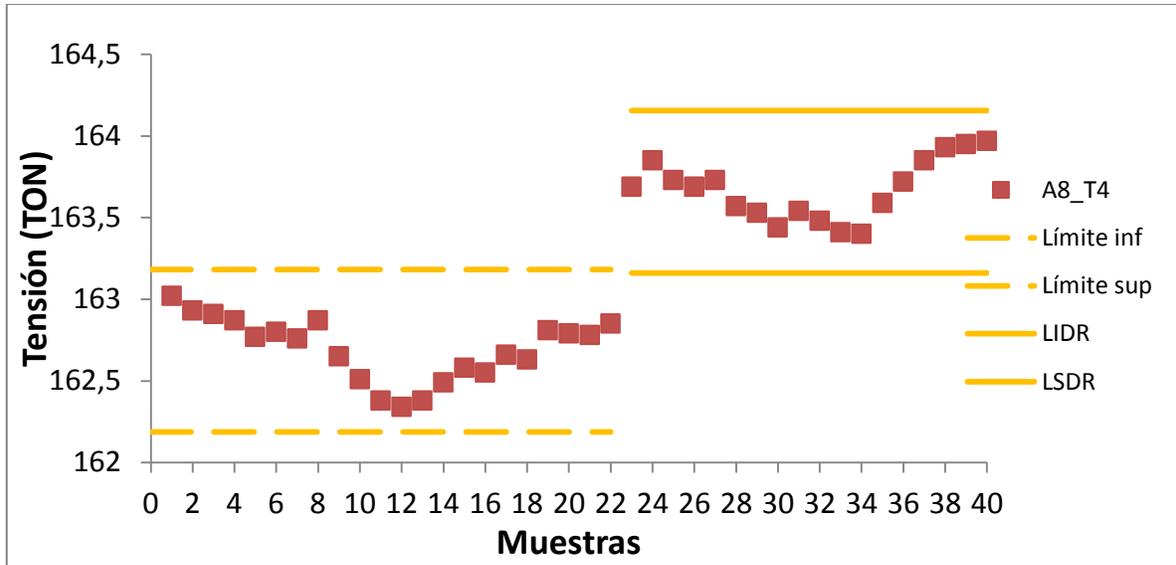


Figura A1.15 Semiarpa 8 - Tirante 4

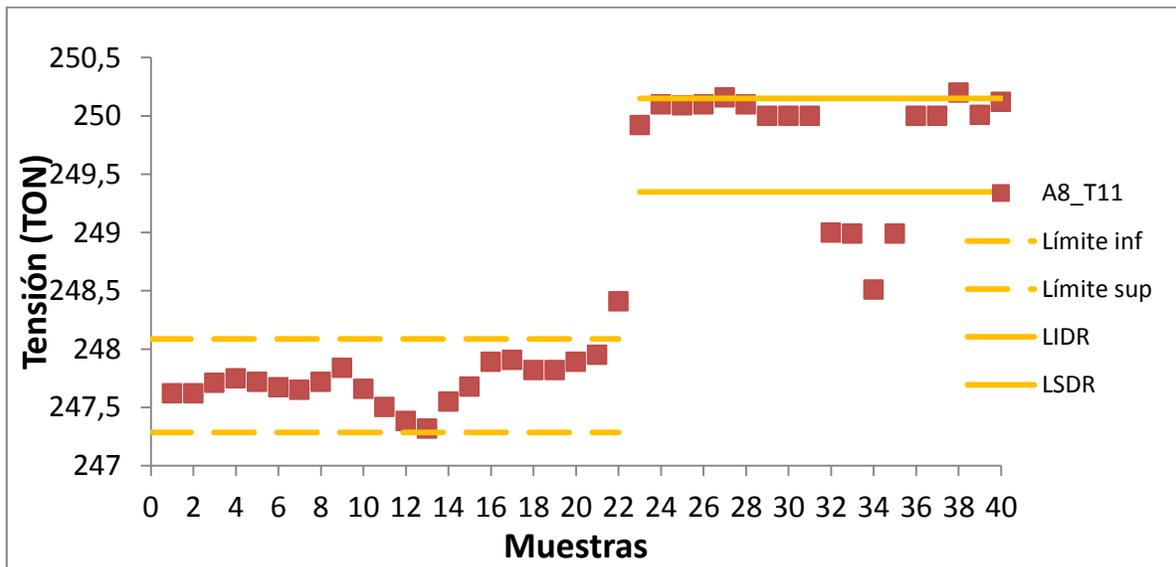


Figura A1.16 Semiarpa 8 - Tirante 11



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

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