



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**SISTEMATIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE FATIGA DE
PUENTES DE GRANDES CLAROS POR TRATAMIENTO
DE SEÑALES REGISTRADAS POR EXTENSÓMETRO
ANTE TRÁFICO PESADO**

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta

Ricardo Maldonado Ríos

Dirigido por

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

Co-Director:

Franziska Schmidt

Querétaro, Qro. A 21 de noviembre de 2019



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

**SISTEMATIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE FATIGA DE PUENTES DE GRANDES CLAROS
POR TRATAMIENTO DE SEÑALES REGISTRADAS POR EXTENSÓMETRO ANTE
TRÁFICO PESADO**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ricardo Maldonado Ríos

Dirigido por:

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

Co-Director:

Franziska Schmidt

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Presidente

Dra. Franziska Schmidt
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Suplente

Dr. Carlos Santiago López Cajún
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Noviembre de 2019
México

RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene por objeto abordar el análisis de fatiga de puentes de grandes claros utilizando información obtenida a partir de galgas extensométricas en las estructuras como parte de los sistemas de salud estructural.

Los puentes de acero suelen utilizarse en la optimización del peso de los puentes, salvando grandes claros entre los apoyos, pero tienen la desventaja de sufrir el fenómeno de fatiga. El hecho de utilizar registros de extensómetros es para aprovechar mediciones realistas. Además, la aplicación de sensores *Weigh in Motion* complementan el análisis, teniendo información sobre las características del tráfico pesado que circula por los puentes.

Para el análisis de fatiga se procede desde la perspectiva S-N para una teoría elástico lineal del fenómeno con curvas establecidas en el código europeo. Más aún, se utiliza el método de conteo de ciclos de *Rainflow* para luego representar el número de ciclos en histogramas. Después, se procede con la regla de Miner para daño acumulado con los datos resumidos en el conteo de ciclos. La vida útil se calcula a partir del daño acumulado.

La metodología anterior se sistematiza para ser incorporada al software DEEFEP creado por la Universidad Autónoma de Querétaro, cuyo objetivo principal es abordar múltiples aspectos de la fatiga en puentes para diagnosticar sus condiciones.

Además, se presenta un caso de aplicación: el puente de Normandía en Francia. Este puente de losa ortótropa instrumentado con sistemas *Weigh in Motion*, así como con galgas extensométricas para revisar dos aspectos particulares: la inclusión no prevista de una ciclovia y la sobrecarga de los vehículos pesados que circulan. Aquí, un modelo de elementos finitos de la sección instrumentada del puente se elabora para verificar el comportamiento por fatiga. La información de los sistemas de monitoreo son proporcionados por el IFSTTAR, donde se realizó una estancia de investigación.

Palabras Clave: *Fatiga, monitoreo estructural, puentes de acero, galgas extensométricas, vida útil.*

SUMMARY

This research work aims to study the fatigue analysis of long-span bridges using information obtained from strain gauges installed in the structures as part of structural health systems.

Steel bridges are a tendency in weight optimization of bridges and saving long spans between the supports, but have the disadvantage of suffering the fatigue phenomenon. The use of extensometer registers is to have realistic strain measures. Also, the application of Weigh in Motion sensors complements the analysis, resulting in information about the characteristics of heavy traffic circulating on the bridge.

Fatigue analysis is proceeded from the S-N perspective for a linear elastic theory of the phenomenon with curves established in the European code. Moreover, the Rainflow cycle counting method is used to represent the number of cycles in histograms afterwards. Then, Miner rule is used for cumulative damage with data summarized in the cycle counting method. Lifetime is calculated from cumulative damage.

The methodology is incorporated into the DEEFEP software created by the University of Querétaro, whose main objective is to address multiple aspects of fatigue in bridges for the diagnosis of their conditions.

An application case is presented: the Normandy Bridge in France. This orthotropic deck bridge is instrumented with Weigh in Motion systems and strain gauges to verify two particular aspects: the unplanned inclusion of a cycle path and the overload of heavy vehicles that circulate in. Here, a finite element model of the instrumented section of the bridge is developed to verify fatigue behavior. Monitoring data was provided by IFSTTAR, where a research internship was conducted.

Keywords: *Fatigue, structural health monitoring, steel bridges, strain gauges, lifetime assessment.*

*A quien da todo y no pide nada,
por nobleza.*

*A quien grita, exige y aprieta,
cuando tiene el derecho.*

*A quien no calla una injusticia,
cuando le asiste la razón.*

A.M.R.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca nacional y la beca mixta otorgadas, fundamentales para la consecución de este estudio.

Agradezco al Instituto Francés de Ciencia y Tecnología del Transporte, de Desarrollo y Redes (IFSTTAR), por el apoyo durante la estancia de investigación, así como la información compartida; en específico al Laboratorio de Experimentación y Modelización de Ingeniería Civil y Urbana (EMGCU) por su colaboración y amistad.

Así mismo, agradezco al Dr. Moisés Arroyo por su tiempo y asesoría, su apoyo para participar en el IFSTTAR y sus enseñanzas dentro y fuera del aula.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	3
SUMMARY.....	4
AGRADECIMIENTOS	6
INTRODUCCIÓN	14
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	15
1.2 JUSTIFICACIÓN	19
1.3 HIPÓTESIS	24
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	24
1.5 OBJETIVOS PARTICULARES	24
2. ANTECEDENTES	25
2.1 EXTENSOMETRÍA Y REGISTRO DE SEÑALES DE DEFORMACIÓN	25
2.2 INSTRUMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE PUENTES DE GRANDES CLAROS	29
2.3 PREDICCIÓN DE VIDA ÚTIL EN PUENTES.....	33
2.4 DIAGNÓSTICO ESTADÍSTICO, EFECTOS DE FATIGA Y EXTREMOS EN PUENTES.....	36
3. MARCO TEÓRICO.....	37
3.1 MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL.....	38
3.2 SOFTWARE DEEFEP.....	40
3.3 TRATAMIENTO DE SEÑALES	41
3.4 REGISTROS DE EXTENSÓMETRO.....	42
3.4.1 GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.....	43
3.4.2 OTROS EXTENSÓMETROS.....	46
3.5 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS	48
3.6 ANÁLISIS DE FATIGA EN PUENTES	49
3.6.1 REGLA DE PALMGREN-MINER.....	56

3.6.2	<i>CURVAS S-N (DE WÖHLER)</i>	57
3.6.3	<i>ALGORITMO DE RAINFLOW</i>	59
3.7	NORMATIVA Y PRÁCTICAS SOBRE EL ANÁLISIS DE FATIGA	62
3.7.1	<i>EUROCODE CAPÍTULO 3</i>	62
3.7.2	<i>JRC: Assessment of Steel Structures</i>	65
3.7.3	<i>GUOBIAO STANDARDS</i>	69
3.7.4	<i>ASTM</i>	69
4.	METODOLOGÍA CLÁSICA DEL ANÁLISIS DE FATIGA	70
4.1	ANÁLISIS DE ESFUERZOS	71
4.2	CONTEO DE CICLOS	74
4.3	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES ANTE FATIGA	75
4.4	DAÑO ACUMULADO Y VIDA ÚTIL POR FATIGA	78
5.	METODOLOGÍA DIRECTA DEL ANÁLISIS DE FATIGA	80
5.1	REGISTRO DE DEFORMACIONES	81
5.2	SÍNTESIS DE ESFUERZOS MÁXIMOS PRESENTADOS	83
5.2.1	<i>PICOS Y VALLES</i>	84
5.2.2	<i>REDUCCIÓN DE DATOS CON UMBRAL</i>	84
5.3	ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE ESFUERZOS	85
5.3.1	<i>CORRECCIÓN DE DERIVA POR TEMPERATURA</i>	86
5.4	COMPORTAMIENTO A LA FATIGA	89
6.	SISTEMATIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE FATIGA	90
7.	CASO DE APLICACIÓN: PUENTE DE NORMANDÍA	92
7.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	93
7.2	MODELO ELEMENTO FINITO	97
7.3	ANÁLISIS DIRECTO DE FATIGA	100
7.4	OBSERVACIONES Y RESULTADOS DEL PUENTE DE NORMANDÍA	101

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	109
CONCLUSIONES	111
REFERENCIAS	113
ANEXOS.....	120

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MOVIMIENTO DOMÉSTICO DE CARGA	17
FIGURA 2. INTERFAZ DEEFEP	41
FIGURA 3. REGISTRO DE DEFORMACIONES	43
FIGURA 4. GALGA EXTENSOMÉTRICA PARA MEDICIÓN DE DEFORMACIONES	44
FIGURA 5. PUENTE DE WHEATSTONE	45
FIGURA 6. INSTRUMENTACIÓN DE GALGAS DE DEFORMACIÓN	46
FIGURA 7. CONFIGURACIÓN DE FIBRA ÓPTICA.....	47
FIGURA 8. ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN PUENTE METÁLICO CON ELEMENTOS FINITOS.....	49
FIGURA 9. ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN PIEZA DE CONEXIÓN.....	49
FIGURA 10. PUNTOS SUSCEPTIBLES DE INICIO DE GRIETA EN SOLDADURA	52
FIGURA 11. ESQUEMA GENERAL DEL DIAGNÓSTICO POR FATIGA DE PUENTES DE ACERO	55
FIGURA 12. VULNERABILIDAD DE LOSA ORTÓTropa A FISURAS POR FATIGA.	56
FIGURA 13. DETERMINACIÓN DE CURVA S-N CON PRUEBAS DE LABORATORIO.....	58
FIGURA 14. HISTÓRICOS DE DEFORMACIÓN Y ESFUERZO E HISTÉRESIS.....	60
FIGURA 15. CONCEPCIÓN DEL MÉTODO DE <i>RAINFLOW</i>	61
FIGURA 16. DISTRIBUCIÓN DE LA POSICIÓN TRANSVERSAL VEHICULAR	65
FIGURA 17. PARÁMETROS DE DAÑO ACUMULADO Y NIVEL DE SEGURIDAD.....	67
FIGURA 18. PARÁMETROS EN HISTÓRICO DE CARGA PARA FATIGA	70

FIGURA 19. METODOLOGÍA GENERAL DEL ANÁLISIS DE FATIGA PARA PUENTES.....	72
FIGURA 20. CALIBRACIÓN DE SISTEMA WEIGH IN MOTION.....	73
FIGURA 21. HISTOGRAMA DE VEHÍCULOS DEL PUENTE DE NORMANDÍA	74
FIGURA 22. HISTOGRAMAS DE <i>RAINFLOW</i>	75
FIGURA 23. CURVA DE RESISTENCIA A LA FATIGA DEL ACERO DE WÖHLER.....	76
FIGURA 24. CURVAS S-N PARA CATEGORÍA DE DETALLE.....	77
FIGURA 25. METODOLOGÍA DIRECTA DEL ANÁLISIS DE FATIGA.....	80
FIGURA 26. REGISTRO DE DEFORMACIONES BRUTAS.....	82
FIGURA 27. HISTÓRICO DE ESFUERZOS EN UNA HORA	83
FIGURA 28. REDUCCIÓN DE REGISTRO A PICOS Y VALLES	84
FIGURA 29. DEFORMACIÓN APARENTE EN POLINOMIOS SEGÚN TEMPERATURA	87
FIGURA 30. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA.....	88
FIGURA 31. CORRECCIÓN DE DERIVA POR TEMPERATURA POR MÍNIMOS CUADRADOS...	89
FIGURA 32. ESTADO ACTUAL DEL SOFTWARE DEEFEP	90
FIGURA 33. REGISTROS DE EXTENSÓMETRO EN SOFTWARE DEEFEP	91
FIGURA 34. FOTOGRAFÍA DE PUENTE DE NORMANDÍA	92
FIGURA 35. COLOCACIÓN DE ÚLTIMO TRAMO DE LOSA ORTÓTropa	93
FIGURA 36. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE NORMANDÍA.....	94

FIGURA 37. POSICIÓN DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS	94
FIGURA 38. CICLOVÍA NO CONTEMPLADA EN PROYECTO INICIAL	95
FIGURA 39. CARRILES DE CIRCULACIÓN DEL PUENTE DE NORMANDÍA.....	96
FIGURA 40. CUBIERTAS Y TENSORES DE PUENTE DE NORMANDÍA.....	98
FIGURA 41. DIFUSIÓN DE CARGA A TRAVÉS DE REVESTIMIENTO.	98
FIGURA 42. SECCIÓN DE PUENTE DEFORMADA POR PESO PROPIO.....	99
FIGURA 43. DISTRIBUCIÓN DEL TRÁFICO PESADO EN EL PUENTE DE NORMANDÍA.....	100
FIGURA 44. SUPERFICIE DE INFLUENCIA EN LA PLACA A CENTRO ENTRE ARTESAS.....	101
FIGURA 45. SUPERFICIE DE INFLUENCIA EN LA JUNTA PLACA-ARTESA.....	101
FIGURA 46. LÍNEAS DE INFLUENCIA TRANSVERSALES	102
FIGURA 47. HISTOGRAMAS DE <i>RAINFLOW</i> PARA REGISTRO DE 4 HORAS	103
FIGURA 48. HISTOGRAMAS DE <i>RAINFLOW</i> PARA REGISTRO DE 40 HORAS	104
FIGURA 49. HISTOGRAMAS DE <i>RAINFLOW</i> DE GALGAS CRÍTICAS.....	105
FIGURA 50. PUNTOS CRÍTICOS POR FATIGA Y HUELLA DE VEHÍCULO PESADO.....	107

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DAÑOS EN INFRAESTRUCTURA. FUENTE: JRC (2008)	22
TABLA 2. ANÁLISIS DE COLAPSOS EN PUENTES HASTA 2001. FUENTE: JRC (2008).....	22
TABLA 3. DAÑO ACUMULADO Y VIDA ÚTIL DE PUNTOS MEDIDOS.	106

ANEXOS

ANEXO A. CONFIGURACIONES DE GALGA EXTENSOMÉTRICA.....	120
ANEXO B. MODELOS DE CARGA POR FATIGA EN-1991-2.....	121
ANEXO C. HOJA TÉCNICA DE LOTE DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS	125
ANEXO D. MEDIDAS DE LOCALIZACIÓN DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.....	126
ANEXO E. CATEGORÍA DE DETALLE (EN-1991-1-9)	127
ANEXO F. HISTOGRAMAS DE <i>RAINFLOW</i>	129
ANEXO G. ALGORITMO DE ANÁLISIS DE FATIGA.....	138

INTRODUCCIÓN

Las estructuras, incluidas los puentes, proporcionan medios fundamentales para la sociedad. La seguridad y servicio de estas estructuras son elementos básicos de una sociedad civilizada y una economía productiva, así como los objetivos últimos de la ingeniería (Xu & Xia, 2012). Es lógico, entonces, que la ingeniería estructural esté en constante búsqueda del entendimiento de los fenómenos para garantizar el correcto y seguro comportamiento de los sistemas estructurales en operación.

La importancia del análisis de la vida útil de las obras públicas radica en que diariamente son utilizadas por miles de usuarios, por lo que el conocimiento del estado de dichas estructuras contribuye en un mejor diagnóstico para considerar una futura rehabilitación, reparación o reemplazo.

Un factor determinante en el comportamiento de piezas mecánicas y todo tipo de elementos sujetos a cargas cíclicas es la fatiga, fenómeno donde el material es degradado en sus propiedades mecánicas debido a la aplicación de cargas cíclicas menores a la resistencia del material.

Al paso del tiempo, como describen Crespo *et al.* (2013), los puentes resienten los efectos de las cargas vehiculares gradualmente, siendo la fatiga y otros aspectos ambientales la causa de la disminución de la resistencia de los elementos que lo conforman. Además, la fatiga puede provocar la falla súbita de un elemento sin dar aviso previo, provocando la redistribución de esfuerzos y mayor exigencia a los elementos contiguos, poniendo a prueba la robustez estructural del sistema.

Este trabajo de investigación se centra en el cálculo del daño sufrido por los elementos de acero en puentes de grandes claros, al ser sometidos a cargas vehiculares cíclicas y de magnitud variable. Dicho sistema de carga produce un efecto de fatiga, que se traduce en el daño sufrido por la estructura, dato utilizado en la estimación de la vida útil del elemento, proceso que se programa para su

integración al módulo de puentes de acero del software Diagnóstico Estadístico, Efectos de Fatiga y Extremos en Puentes (DEEFEP), desarrollado por la División de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, tomando en cuenta las deformaciones registradas por extensómetro de la estructura a evaluar, siendo el objeto de estudio el puente de Normandía, en Francia; puente mixto (concreto y acero), estructurado por una losa ortótropa, instrumentado con galgas extensométricas, sonda de temperatura y sistemas de pesaje en movimiento. Estas características se utilizan para llevar a cabo un monitoreo que se resume en un diagnóstico general de la estructura. Por tanto, se presenta un ejemplo de aplicación directa para la evaluación del daño y vida útil para dicho puente con la información registrada por los extensómetros, donde el análisis de fatiga es independiente de las líneas y superficies de influencia.

El análisis de fatiga exige que estas mediciones sean lo más precisas posibles, por lo que la corrección del desvío debido a la temperatura sobre el registro de los datos se presenta de igual manera. Al obtener los esfuerzos presentes de la estructura, se inicia con el análisis tradicional de la fatiga, aplicando el conteo de ciclos de *Rainflow* y calculando el daño acumulado por la regla de Miner.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El peso propio de las estructuras y, por ende, los materiales para la construcción de la obra son parámetros relevantes en la optimización; sin embargo, la mayoría de las veces, la disminución de peso de una estructura viene acompañada de un incremento en la deformabilidad y, con ello, una exposición a otro tipo de situaciones, entre las que destacan las vibraciones y el comportamiento a la fatiga.

El puente es una estructura que forma parte del desarrollo evolutivo y social del hombre, gracias a que lo ha llevado a lugares inaccesibles, a relacionar extremos que permanecían incomunicados y a facilitar el movimiento de las masas. Estas estructuras son testimonios del avance tecnológico y económico de las sociedades y en México, los puentes carreteros forman parte de la red de comunicación y distribución de mercancías; así que, el intento de estar a la vanguardia en infraestructura representa un reto y oportunidad al llevar a cabo la construcción y mantenimiento de estos viaductos tan utilizados y exigidos.

En México se cuenta con 7,288 puentes registrados, según la base de datos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes; además, se tiene estimado que existen 6,854 puentes en la red federal de carreteras, de los cuales más del 57% de ellos (3,700) cuenta con cerca de 50 años de servicio (García *et al.*, 2013), sobrepasando el tiempo de operación para el que fueron diseñados. Es evidente que el transporte terrestre es el preferente para el movimiento de mercancías a lo largo del país, por lo que las vías ferroviarias y carreteras son fundamentales para el flujo económico nacional, abarcando más del 90 por ciento del movimiento doméstico de carga, según información del Instituto Mexicano del Transporte, dentro de su Manual Estadístico del sector Transporte del 2017.

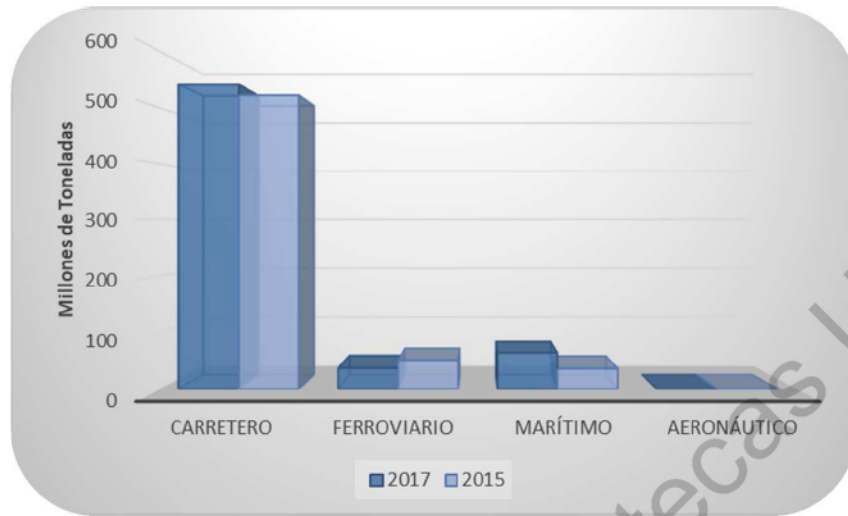


Figura 1. Movimiento Doméstico de Carga. Datos: Manual Estadístico del IMT, v. 2015 y 2017

Es importante mencionar que ante el crecimiento de la población y al desarrollo económico, las demandas de mercancías al igual incrementan, por tal motivo el transporte carretero en México ha evolucionado constantemente. Es así como vehículos más pesados aparecen frecuentemente y por esta situación los vehículos utilizados con anterioridad para el diseño de los puentes según normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes han dejado de ser representativos del tráfico que circula actualmente por las carreteras federales. Las cargas utilizadas para el diseño de los puentes son las que teóricamente producen los elementos mecánicos más desfavorables en la estructura, sin embargo no es posible utilizar estas cargas para la revisión ya que no son representativas del tráfico real (Medina, 2014).

Las cargas con las que se diseñan los puentes son idealizadas. En la realidad, dichas cargas varían respecto a cada vehículo, y para medirlas existen básculas estáticas para el pesaje del tráfico vehicular, aunque también existen métodos de pesaje dinámico como lo es el Weigh in Motion (WIM). Este último sistema obtiene datos reales de las cargas aplicadas para cada vehículo (Jacob & Eymard., 1989).

Desafortunadamente en México el registro de pesaje en movimiento (WIM) en las carreteras mexicanas no existe (Herrada, 2013).

Moreno (2016a) propone un modelo de simulación de escenarios de tráfico pesado pudiendo predecir mejor el comportamiento de los puentes e infraestructura de transporte ante cargas recientes, a falta de dispositivos de pesaje en movimiento (WIM) en la infraestructura carretera de México.

Álvarez (2017) menciona que el modelo matemático para la predicción de la vida útil por fatiga de los puentes es hasta el momento analítica. Él mismo describe cómo se acoplan las cargas virtuales generadas por la simulación de escenarios de tráfico vehicular pesado representativo en México propuesto por Moreno (2016a), con el modelo de predicción de vida útil para puentes de concreto presforzado mejorado por Moreno (2016b) y compara la certeza de predicción del modelo, analizando puentes carreteros existentes dañados por el efecto de la fatiga y calibrando el modelo en relación a las discrepancias que se encuentren.

Sin embargo, es necesario afinar el proceso con el que se dictamina el estado actual de los puentes en México, tarea que conduce a la mejor descripción de los fenómenos presentes en un puente, caracterizando el mayor número de variables posibles y contemplándolas en el análisis. Por lo cual, en este caso, es de suma importancia describir el efecto que se producen en puentes de claros de gran tamaño, ya que el comportamiento de éstos, dista del fenómeno ocurrido en puentes de claro corto, a decir: esfuerzo cortante, vibraciones, torsiones, flexiones.

La falla por fatiga en el acero se debe a la aparición y propagación progresiva de fisuras sometidas a cargas cíclicas. Por tanto, los puentes de acero sujetos a cargas cíclicas son el objeto de estudio de este trabajo, donde su comportamiento a fatiga es el que produce el mayor daño estructural y no el efecto de las cargas de servicio, las cuales quedan por debajo de la resistencia del puente. Además, los puentes de

grandes claros sufren de múltiples cargas vehiculares, a diferencia de puentes de claros cortos o medianos. Es necesario profundizar en la relación existente entre los esfuerzos presentes en dichos puentes y su frecuencia, por lo que se registran con extensómetros u otros dispositivos que brindan información respecto a las cargas o los efectos de ellas en la estructura; presentando así, un panorama de lo exigidos que están los elementos. Sin embargo, muchos de estos dispositivos son independientes del número o tipo de vehículos que circulan en la estructura y solo se enfocan en las tensiones o compresiones que éstos provocan.

Utilizando los modelos propuestos por Moreno (2016a) y datos de pesaje dinámico WIM se busca simular y comparar los daños que los vehículos produzcan a la estructura con la metodología desarrollada por la línea de investigación de modelación y experimentación de sistemas físicos de la Universidad Autónoma de Querétaro en el software Diagnóstico Estadístico, Efectos de Fatiga y Extremos en Puentes (DEEFEP), contra la metodología directa propuesta en este trabajo, la cual se pretende integrar a dicho software para su complemento.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Para cargas en movimiento, las deformaciones y esfuerzos dinámicos de las estructuras son significativamente más altos que los causados por las cargas estáticas correspondientes según Zhu *et al.* (2015). Por tanto, los puentes son estructuras que se diseñan para resistir cargas por encima de las cargas estáticas, pero la incertidumbre de otros fenómenos (fatiga, viento, defectos constructivos, aumento del tráfico, sismo, exposición ambiental) requieren estudios específicos ya que las condiciones de sitio hacen de cada estructura un problema excepcional.

En los últimos años la evaluación de las cargas en puentes carreteros ha sido reconocida como un área con la que se puede ahorrar y evitar rehabilitaciones y

reemplazos innecesarios (Medina, 2014). Esto viene a reforzarse con el hecho de que es más frecuente ver que se instrumenten estructuras para su constante monitoreo, ya sean edificios ante la necesidad de prevenir desastres ante fenómenos sísmicos, o puentes que están sujetos a múltiples configuraciones de cargas dinámicas.

El contar con una herramienta que permita hacer el análisis estadístico de cargas, identifique las leyes de distribución de las variables, pronostique los valores extremos de pesos, realice el cálculo de líneas de influencia y estime la vida a fatiga, puede ser de gran ayuda para realizar la evaluación del comportamiento de puentes ante tráfico pesado (Bárceñas, 2011). Por tanto, la actualización y mejora que reciba el software DEEFEP abundará en dicho propósito.

Como subraya Álvarez (2017), es importante mencionar que gran parte de los puentes que existen en la red carretera del país se están haciendo viejos, el 57% del total de puentes del país cuenta con más de 40 años de servicio y es necesario el contar con una herramienta confiable que evalúe el comportamiento de las vigas en relación a la fatiga, ya que las condiciones de diseño de dichos puentes son remarcablemente diferentes a las condiciones actuales de carga vehicular.

Para la pronta intervención y el ahorro económico por fallas estructurales en un puente, es relevante el conocimiento del daño que se puede llegar a producir por el fenómeno de fatiga. El software DEEFEP es una herramienta computacional producto de la línea de investigación de modelación y experimentación de sistemas físicos de la división de posgrado de la Universidad Autónoma de Querétaro; por lo que representa la preocupación de valorar la infraestructura nacional actual, contribuyendo al mantenimiento y desarrollo de la red de carreteras.

La valoración que las autoridades (Secretaría de Comunicaciones y Transporte a través de la Dirección General de Conservación de Carreteras) realizan hoy en día,

consta de dos fases. La primera etapa del procedimiento aplicado por la SCT es una evaluación subjetiva de cada estructura, en función de la cuantificación de las condiciones de diferentes parámetros, donde se indican características geométricas y estructurales básicas, ubicación de la estructura, estado físico general y tráfico que soportan. A partir de esta evaluación se asigna una calificación global al puente entre cero y cinco, que cualitativamente muestra las condiciones de reparación y mantenimiento. La segunda fase se centra en una evaluación espacial que conjunta las observaciones visuales con métodos estimativos de la demanda y capacidad de la estructura. La aplicación de estas evaluaciones se realiza a través del modelo de Sistema de Puentes de México (SIPUMEX).

Más de la mitad de los puentes en México han sobrepasado su tiempo de operación, por lo que el mantenimiento, reemplazo o reparación implican un fuerte costo económico. El hecho de tener una herramienta que establezca el estado estructural actual de puentes es de gran ayuda, y más aún, si no representa una fuerte inversión e involucra el desarrollo de tecnología nacional.

De la enorme cantidad de puentes en México, sólo cerca de una decena tiene claros mayores a cien metros, entre los que destacan el Baluarte (520m), Tampico (360m), Papaloapan (203m) y San Marcos (180m), por lo que un mayor conocimiento de los fenómenos presentes en este tipo de estructuras confluye en la posibilidad de creación de más proyectos de esta índole.

Es importante la enorme cantidad de trabajo que se lleva a cabo en la evaluación de puentes (Omishore, 2017), un campo de gran evolución y relativamente nuevo en la ciencia de diseño de puentes, una consecuencia de la importancia que tienen estas obras para propietarios, usuarios y autoridades del transporte.

La fatiga es la tercera causa de daños en estructuras; peor aún, es la primera causa de daño en puentes. Además, según la ASCE (1982; Ye *et al.*, 2014), el 80 al 90

por ciento de las fallas en estructuras metálicas están relacionados a fisuras por fatiga.

Tabla 1. Daños en Infraestructura. Fuente: JRC (2008)

Causante de daño (Múltiple denominación posible)	Total		Edificios		Puentes		Transportadoras	
	No.		No.		No.		No.	
Resistencia estática	161	29.65	102	33.55	19	14.84	40	36.04
Estabilidad (local o global)	87	16.02	62	20.39	11	8.59	14	12.61
Fatiga	92	16.94	8	2.63	49	38.28	35	31.53
Movimiento de cuerpo rígido	44	8.10	25	8.22	2	1.56	17	15.32
Deformación elástica	15	2.76	14	4.61	1	0.78	0	0.00
Falla frágil	15	2.76	9	2.96	5	3.91	1	0.90
Medio ambiente	101	18.60	59	19.41	41	32.03	1	0.90
Temperatura	23	4.24	23	7.57	0	0.00	0	0.00
Otros	5	0.92	2	0.66	0	0.00	3	2.70
Suma	543	100.00	304	100.00	128	100.00	111	100.00

A través del siguiente estudio, se muestran los colapsos de puentes conocidos hasta 2008, en el que destaca la falla de puentes en servicio sin influencia externa como segunda causa principal (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis de colapsos en puentes hasta 2001. Fuente: JRC (2008)

Colapso	Cantidad de Colapsos	
	Con información detallada	Sin información detallada
Durante construcción	93	20
En servicio sin influencia externa	86	35
Debido a impacto de embarcaciones	48	4
Debido al tráfico bajo el puente	16	0
Debido al tráfico en el puente	18	5
Debido al nivel de agua o hielo	32	10
Provocado por fuego, explosión, etcétera	15	2
Por falla en superestructura	48	14
Total	356	90

La primera causa de colapso en puentes en dicho estudio, se presenta durante la construcción del mismo, situación que ha disminuido con el avance de tecnologías en grúas elevadas, sistemas de piloteo, así como control de calidad en los materiales y procesos de construcción.

Sin embargo, los colapsos por la influencia del tráfico en el puente y, más aún, por servicio sin influencia externa siguen siendo tema de solicitada investigación.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

1.3 HIPÓTESIS

El algoritmo generado por tratamiento de señales registradas con extensómetro en condiciones de tráfico pesado permite calcular la vida útil por fatiga de puentes de grandes claros, utilizando la regla de daño acumulado de Miner, así como su integración al software Diagnóstico Estadístico Efectos de Fatiga y Extremos en Puentes.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un algoritmo que calcule el análisis de vida útil a fatiga con la regla de Miner para puentes de grandes claros, integrarlo al software DEEFEP utilizando registros de señales registradas ante tráfico pesado por galgas extensométricas para el diagnóstico del estado actual de infraestructura.

1.5 OBJETIVOS PARTICULARES

- Procesar los registros de galgas extensométricas para posterior análisis.
- Sistematizar la regla de Miner, el uso de curvas S-N y el algoritmo de *Rainflow*.
- Calcular la vida útil de diferentes puentes de grandes claros aplicando el análisis de fatiga con registros de extensómetro.
- Complementar el software DEEFEP con el algoritmo elaborado, para un análisis más cercano a los fenómenos reales ante el tráfico de vehículos en puentes de grandes claros.

2. ANTECEDENTES

Los primeros ingenieros estructurales descubrieron que bajo cargas en movimiento, las deformaciones y esfuerzos dinámicos de las estructuras pueden ser significativamente más altos que los causados por las cargas estáticas correspondientes (Zhu *et al.*, 2015). Tal es el caso de los puentes.

Los puentes se pueden clasificar por longitudes libres, vanos, luces o claros, en tramo corto, tramo medio, tramo largo, y también por tipo, como puentes de tablero, puentes de arco, puentes atirantados y puentes colgantes. Tang (2017) estudia qué tan grandes pueden ser dichos tramos según su longitud analizando la factibilidad de un puente “súper largo” de claro de diez kilómetros para un puente colgante.

Al envejecer cualquier infraestructura, las prácticas de mantenimiento se vuelven recurrentes, por lo que se busca economizar en cuanto a estas prácticas haciendo que la estructura siga operando de la manera en que se concibió. Una práctica para conocer las deformaciones en estructuras, es el uso de extensómetros, instrumentos creados para medir deformaciones de elemento sometidos a esfuerzos.

2.1 EXTENSOMETRÍA Y REGISTRO DE SEÑALES DE DEFORMACIÓN

En el pasado, los profesionales de la ingeniería civil han mantenido la integridad de estructuras, puentes, edificios, plataformas marinas y plantas de energía por medio de sistemas manuales de inspección, evaluación no destructiva (NDE, por sus siglas en inglés) e interpretación de datos utilizando tecnologías convencionales. Sin embargo, la evaluación no destructiva presenta un alto grado de incertidumbre, por lo que se busca profundizar en evaluaciones con otro tipo de

técnicas, que aprovechen el desarrollo tecnológico para recuperación de datos más completa, facilidad en el procesamiento de datos o que revolucionen la manera de diagnosticar una característica de la estructura.

Oka *et al.* (1989) idearon un dispositivo portátil capaz de medir las micro-deformaciones por computadora, recogiendo datos en línea para su posterior análisis. Este sistema puede usarse para determinar si los esfuerzos producidos por los ciclos de carga viva experimentados por un elemento particular de un puente son capaces de producir una falla por fatiga o el crecimiento potencial de grietas ya existentes. El sistema de galgas extensométricas que utilizan es de bajo costo y podría utilizarse como precursor económico de las pruebas no destructivas, priorizando la inspección en este tipo de infraestructura.

El monitoreo de datos de deformación brinda la posibilidad de evaluar la fatiga de los componentes críticos en estructuras reales bajo las condiciones operacionales (Deng *et al.*, 2015). En estructuras como puentes, se someten los elementos a millones de ciclos de carga, debido al tráfico, por lo que el daño por el fenómeno de fatiga y las fisuras que éste produce redundan en un estado crítico de falla en puentes de acero.

Kovačič *et al.* (2015) refieren que el resultado de la medición de la tensión se puede utilizar para estudios relativos a los esfuerzos del material, a la naturaleza y a la cantidad de fuerzas que actúan sobre la muestra, etc. Sin embargo, se transfiere una tensión a medir sin fallas y sin pérdida. Para ello, se requiere una conexión íntima entre el extensómetro y el objeto a medir; por tanto, un riguroso control en el manejo del material y aplicación técnica debe realizarse.

En cuanto a las señales registradas por los dispositivos, se debe dar un tratamiento para obtener la información útil para los análisis de diferentes tipos (de esfuerzos, vibraciones, de imagen, de sonido, etcétera). La representación de tiempo-

frecuencia es adecuada para señales de carga estática y señales de carga dinámica, para la medición de desplazamientos y tensiones verticales en elementos estructurales. Estas mediciones se llevan a cabo durante la construcción para controlar el sistema, después de la construcción con el fin de monitorear el objeto y para la evaluación de la confiabilidad después de un cierto tiempo de uso (Kamnik *et al.*, 2015). Desafortunadamente, la mayor parte de las estructuras son monitoreadas después de su construcción y no proporcionan la evolución de las características a medir desde un inicio, pero sí lo hacen a partir del instante que se utiliza el sistema.

Ataei *et al.* (2005) concluyen que las muestras de campo de las vibraciones producidas por el paso de un vehículo resultan ser pruebas económicas y prácticas de la evaluación de cargas de un puente. El procesamiento de datos de este tipo de pruebas conlleva al uso de técnicas de medición paramétrica y no paramétrica basadas en probabilidad. Presentan un marco eficiente y robusto para el procesamiento de datos utilizando redes neuronales para sensores de deformación y desplazamiento de un puente.

Los avances en la producción de fibras ópticas hicieron posible el desarrollo reciente de sistemas de detección innovadores para el monitoreo de la salud de las estructuras civiles. Las principales razones de este desarrollo son la reducción del peso y dimensiones de los sensores de fibra óptica, la fuerte inmunidad a la interferencia electromagnética, la resistencia ambiental mejorada y la flexibilidad de la escala para mediciones de calibre pequeño y de gran calibre (Casas & Cruz, 2003).

Las mediciones de deformación de las galgas tradicionales de puntos sólo revelan información local estructural. Esta característica limita significativamente el

desarrollo y la aplicación de la teoría modal de los esfuerzos en ingeniería civil. El sensor de esfuerzos de fibra óptica de gran calibre que surgió recientemente tiene el único mérito de reflejar tanto la información local de una estructura como la global mediante la medición de la tensión promediada dentro de una longitud de gran calibre (Zhang *et al.*, 2015).

Zhang *et al.* (2016) demuestran las ventajas del uso de los sensores de fibra óptica de gran calibre, como lo es la presentación de información local y global de la estructura. También proponen un método para calcular la distribución de deformaciones a partir de los esfuerzos medidos por los sensores de gran calibre, en el cual el efecto de deformación por cortante es considerado por cuestiones geométricas del caso estudiado.

Hong *et al.* (2016) presentan un novedoso método de evaluación de daños fundamentado en los sensores de deformación de gran calibre. Su procedimiento diagnostica el estado de estructuras y se presume que es aplicable a la supervisión del mantenimiento y conservación estructural a largo plazo. Su procedimiento consistió en hacer simulación numérica con un modelo de elementos finitos, además de monitorear un puente real y hacer experimentación con modelos a escala.

En Estados Unidos, Fasl *et al.* (2016) instalaron galgas para la medición de deformaciones y de propagación de grietas en los puntos críticos de un puente, cerca de grietas provocadas por fatiga, localizadas por inspecciones manuales anuales. Los datos arrojaron que el puente había excedido su vida útil por fatiga, por lo que la estructura debía ser reemplazada o reparada. Se decidió hacer ambas (refuerzo durante el proceso de reemplazo). El comportamiento del puente fue monitoreado antes, durante y después del refuerzo, lo que arrojó una mejora drástica del comportamiento del puente en la condición reforzada. Concluyen que el desarrollo del comportamiento compuesto en puentes viejos no compactos puede ser un método potencial para mitigar el daño por fatiga.

En 2015, Johnson desarrolla algunas técnicas medidas de un sistema de pesaje en movimiento en puentes (B-WIM), con la representación de histogramas a partir de los ciclos de *Rainflow*, con el objetivo de comprimir la información necesaria en el tratamiento de datos.

2.2 INSTRUMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE PUENTES DE GRANDES CLAROS

Existe una tendencia creciente en el monitoreo de estructuras de gran impacto como puentes de grandes claros donde se tiene un rol económico importante, desde la inversión del proyecto hasta las ventajas geográficas que permite el uso de ellos. Por lo que el servicio de este tipo de estructuras debe estar garantizado la mayor parte del tiempo. Más aún, los puentes de grandes claros funcionan como laboratorios foráneos experimentándose en ellos con técnicas innovadoras en diseño, construcción y monitoreo. Por ello y más, es irrefutable el papel de la seguridad estructural en el tiempo de operación de obras de gran impacto (*ouvrages d'art*).

Es posible evaluar el nivel de seguridad de un puente de grandes claros utilizando una perspectiva probabilista en términos de sus componentes e índices de confiabilidad del sistema, además con sistemas de salud estructural se minimiza la incertidumbre relacionada a fenómenos difíciles de modelar (Catbas et al., 2008). Además, es de suma importancia considerar las deformaciones inducidas por temperatura y realizar instrumentación a largo plazo, intentando monitorear la mayor cantidad de puntos y, que dichos puntos, sean relevantes para el estudio.

Wiberg y Karoumi (2009) instrumentaron un nuevo puente ferroviario de largo alcance para comprender y monitorear su comportamiento dinámico. Las propiedades dinámicas del puente fueron estimadas utilizando una técnica estocástica de identificación de subespacio como salida, junto con los métodos de selección de pico tradicionales. Se identificaron y verificaron las frecuencias

naturales del puente; se proponen actualizar las frecuencias obtenidas y los coeficientes de amortiguamiento utilizando modelos de elementos finitos más desarrollados.

Lee *et al.* (2005) realizan análisis dinámicos de puentes de vigas cajón de grandes claras, sujetas a cargas móviles, utilizando elementos finitos Lagrangianos y Hermitianos de cuatro nodos. Los resultados numéricos muestran una buena relación con los datos experimentales de un puente formado por vigas cajón de concreto pretensado de dos claros bajo el efecto del tráfico de vehículos. Los estudios paramétricos se enfocan en los múltiples efectos de las cargas móviles en el comportamiento dinámico para diferentes posiciones de la sección transversal de los puentes con viga cajón.

Wu *et al.* (2016) presentan un nuevo método para identificar el daño y evaluar la capacidad de carga de un puente, relacionando la rigidez a flexión y la deformación de un elemento local con la teoría de líneas de influencia de tensión en el movimiento de cargas vehicular, por lo que obtuvieron una respuesta de deformación estática utilizando el método de descomposición, formando una curva de coeficiente con la envolvente de la deformación. Su método exhibe buen desempeño en cuanto a localización y cuantificación del daño, así como su importancia en la evaluación de la capacidad de carga.

Se contraponen el crecimiento del tráfico, el impacto dinámico y los patrones de tráfico real al presentarse una metodología por Lu *et al.* (2017) en la que evalúan la extrapolación estadística de los efectos de la carga de tráfico en puentes de largo alcance. Se simulan los impactos dinámicos de las cargas de tráfico con un sistema de vibración acoplado; las características estadísticas se capturaron usando un modelo de paso de nivel, mientras que el patrón de tráfico real se simuló por flujos de tráfico estocásticos con base en las estadísticas de las mediciones de *Weigh in Motion* de un puente carretero. El estudio de un puente colgante de largo alcance

mostró la efectividad de dicha metodología para la extrapolación estadística de la deflexión máxima. Así mismo Lu *et al.* (2018), conociendo que el flujo denso de tráfico gobierna el estado límite de carga vehicular en puentes de grandes claros, resalta la importancia de la medición del tráfico y el aporte del monitoreo estructural para la concepción de modelos de carga vehicular.

Los puentes de largo alcance se deforman cuasi-estáticamente y dinámicamente bajo un rango de condiciones operacionales incluyendo viento, tráfico y cargas térmicas, con patrones variables, a diferentes escalas de tiempo y con diferentes amplitudes. Mientras las cargas externas y las fuerzas internas rara vez se pueden medir, existen tecnologías desarrolladas para medir deformaciones y sus derivadas de tiempo y espacio. Los datos de rendimiento se pueden comparar con los límites de diseño y se pueden usar para validar conceptos y modelos numéricos que a su vez pueden usarse para estimar las cargas externas y las fuerzas internas. Los cambios en el rendimiento de los patrones y las relaciones de carga-respuesta también se pueden usar directamente como herramienta de diagnóstico, pero las deformaciones excesivas que se producen son también una preocupación en términos de capacidad de servicio (Brownjohn *et al.*, 2015).

La carga de tráfico de puentes de tramo largo se rige por la congestión. Las observaciones en la realidad muestran que la congestión puede tomar distintas formas. Sin embargo, la mayoría de los estudios previos sobre la carga del tráfico de puentes consideran sólo filas de vehículos a distancias mínimas de parachoques a parachoques. De hecho, tales filas completas son eventos raros, mientras que en la mayoría de los casos las ondas de congestión se propagan a través del flujo de tráfico, de modo que en un puente hay periódicamente tiempos de concentraciones de vehículos espaciados y tiempos de tráfico fluido, donde los vehículos están más distantes (OBrien, Lipari, & Caprani, 2015). El estudio de la congestión de tráfico llevó a realizar una micro simulación en dos puentes de 200 y 1000 metros,

respectivamente, con ciertas consideraciones para cada tipo de vehículo y diferentes condiciones de congestionamiento vehicular. Como resultado, se obtienen diferentes porcentajes de sobreestimación de la carga total para cada caso de estudio.

Se han realizado múltiples aplicaciones con elementos finitos que interpolan los efectos de la carga en cada punto discreto de puentes. Sin embargo, la incertidumbre de fenómenos referentes a la calidad de materiales y procesos constructivos, diferencias entre suposiciones teóricas y prácticas de las cargas, temperatura, viento y diversos procesos ambientales, hacen complicado el cálculo preciso de las deformaciones y esfuerzos sufridos por una estructura.

Dentro del estudio del comportamiento de losas ortótropas, utilizadas generalmente en puentes de grandes claros, se han detectado fisuras en las soldaduras de puentes jóvenes, por lo que se ha propuesto el refuerzo de la cubierta de acero combinado con monitoreo de salud estructural, basado en galgas extensométricas a corto y largo plazo (Teixeira de Freitas & Kolstein, 2012); sin embargo, el problema resulta complejo debido a la variabilidad de las amplitudes de esfuerzo según la posición de la llanta de los vehículos que transmiten la carga a la cubierta portante. Por tanto, al retomar el trabajo de Xiao *et al.* (2008), se resume que en la sección transversal de una losa ortótropa los esfuerzos transversales de otros ejes no interfieren y pueden despreciarse para el cálculo de esfuerzos locales y sólo importan los esfuerzos transversales provocados por el neumático cuando se encuentra en las inmediaciones de los puntos de análisis. Los esfuerzos transversales se refieren a componentes perpendiculares al eje del puente, paralelos a las artesas y relevantes en la iniciación de grietas de la junta placa-artesa.

En 2017, Yang, Li y Yan realizan un estudio del arte, así como una comparación entre los códigos chinos existentes para el monitoreo estructural de puentes teniendo como referencia la norma nacional GB 50982-2014.

2.3 PREDICCIÓN DE VIDA ÚTIL EN PUENTES

Desde los años veinte y treinta del siglo XX, se ha estudiado el daño por fatiga con la introducción del término de daño acumulado por Palmgren. Sin embargo, es hasta en 1945, cuando Miner lo expresa matemáticamente y se conserva hasta ahora como una regla de comportamiento lineal.

A pesar de tener muchos años de estudio, el fenómeno de fatiga sigue sin resolverse y muchos modelos han sido propuestos (Fatemi & Yang, 1998). Entre las teorías que se han manejado para la mejora de la regla de comportamiento lineal de Miner, se encuentran la curva de daño y modificaciones a ella, la resistencia límite, la modificación de la curva S-N, el daño en dos etapas, el crecimiento de grieta, modelos de daño en medios continuos y métodos energéticos. Sin embargo, ninguno de ellos cuenta con una aceptación universal, aunque la teoría del crecimiento de grieta se sigue estudiando y la regla de Miner continúa siendo la teoría más utilizada en diseño mecánico por fatiga actualmente, teniendo las consideraciones de la linealidad del daño, con trabajos paralelos de modelos de elemento finito.

Por otro lado, en cuanto aplicación, un método para la obtención de vida remanente de un puente viejo fue utilizado por Widyawati *et al.* (2014), al obtener especímenes de concreto de las principales vigas, columna y losas del puente, para los cuales se hicieron pruebas de resistencia a la compresión, profundidad de carbonatación y de ion cloruro. La vida útil restante se basa en el método de profundidad de

carbonatación, considerado en términos del avance del deterioro que resulta en la corrosión del acero de refuerzo.

En Portugal, se propuso la determinación de la vida remanente basada en el método de elementos finitos por Sousa *et al.* (2013), considerando la evolución de la resistencia a compresión del concreto, así como sus propiedades elásticas, deformaciones de fluencia en el concreto y cables presforzados. A su vez, se obtuvieron mediciones al monitorear en la fase de construcción, que proporcionaron los datos de las propiedades de los materiales.

En el mismo año, se llevó a cabo un análisis de deterioro estructural por fatiga en puentes de concreto reforzado por Crespo *et al.* (2013), usando modelos de elementos finitos para la distribución de esfuerzos y la parte del deterioro fue representada con el crecimiento de la grieta en la zona más esforzada de la estructura. Todo ello los llevó a sugerir un método que calculara la capacidad de carga y la estimación de vida por fatiga de los puentes. De igual manera, pero un año después, se realizó la evaluación de desempeño del puente "SK Bridge" en Japón; un puente de concreto reforzado analizado por simple inspección utilizando el sistema *Bridge Rating Expert System* (BRES), desarrollado por los Emoto *et al.* (2014).

En Teherán, Kashefi *et al.* (2010), realizaron la evaluación de la vida remanente de un puente con vigas de acero, concluyendo que la fatiga es un fenómeno importante a considerar debido a la falta de métodos teóricos que describan el período restante de la estructura. Los autores realizaron mediciones de esfuerzos por una semana localizados en las secciones críticas; probaron muestras de vigas de puentes desmontados en el laboratorio en secciones similares, difiriendo sus resultados reales con los de laboratorio, teniendo que las vigas en el puente no fallarían nunca por fatiga debido a la baja carga de servicio; sin embargo, las muestras de laboratorio mostraron que no eran elementos aptos para su futuro uso.

En Hungría, 2015, Dudás y colegas instrumentaron un puente de acero con cubierta ortótropa para investigar el comportamiento por fatiga, así como encontrar la relación con información proveída por un modelo de elementos finitos y pruebas de los materiales de construcción del puente. Se reportan experimentos sobre especímenes de secciones cerradas de los refuerzos longitudinales en gran escala, específicamente analizadas en las juntas (soldaduras) y la necesidad de combinar diferentes análisis de fatiga para tener una perspectiva completa del comportamiento del puente.

Omishore (2017) discute el estado del arte de la evaluación de la fatiga y considera nuevas posibilidades de aplicación en los métodos probabilísticos para la confiabilidad del cálculo de la vida útil de puentes de acero.

El tráfico se puede categorizar en tres modelos: ligero, moderado y denso. Con la ayuda sistemas de registro de pesaje en movimiento (WIM) y la definición de los modelos anteriores, se extrapolan los efectos de la carga vehicular en los puentes de grandes claros (Lu, Liu & Beer, 2018). Los efectos no lineales de las cargas vehiculares pueden considerarse como eventos críticos extremos a analizarse por líneas de influencia. De esa manera, Zhang y Au (2017) proponen un modelo de carga probabilístico que simula los vehículos a lo largo del puente con base en registros de un sistema de pesaje en movimiento que no sólo considera el comportamiento del tráfico por jornada, sino que contempla la variación anual del tráfico. Además, llevan a cabo la evaluación de la confiabilidad estadística por fatiga en los puntos críticos para de ahí, abstraer la vida útil remanente del puente.

2.4 DIAGNÓSTICO ESTADÍSTICO, EFECTOS DE FATIGA Y EXTREMOS EN PUENTES

Debe referenciarse el desarrollo del software DEEFEP (Diagnóstico Estadístico, Efectos de Fatiga y Extremos en Puentes), cuya elaboración fue engendrada por el área de estructuras de la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería. Bárcenas (2011) inicia con el desarrollo de éste, con el nombre DEFP (Diagnóstico Estadístico y de Fatiga en Puentes), un modelo sistematizado que evalúa la vida a fatiga en puentes de acero, utilizando datos de pesaje dinámico WIM con los cuales calculó por medio de líneas de influencia los esfuerzos, realizando el conteo de esfuerzos por medio del método de *Rainflow* y la predicción de la vida a fatiga por medio de la aplicación de la Regla de Miner (Álvarez, 2017). A partir de ahí, vinieron mejoras al programa y Herrada (2013) moderniza el software, llamándolo DEEFEP (Diagnóstico Estadístico. Efectos de Fatiga y Extremos en Puentes ante cargas de tráfico pesado), teniendo una interfaz más amigable. A su vez, Medina (2014) propone una metodología para evaluar la vida a fatiga de puentes de concreto presforzado retomando dicho software. Moreno (2016b) integra modelos de propagación de grietas, mientras que Moreno (2016a) agregó el modelo de simulación antes mencionado al DEEFEP.

3. MARCO TEÓRICO

La investigación sigue la línea de modelación y experimentación de sistemas físicos de la UAQ. En este caso, el objeto de estudio es una estructura tipo puente, cuyo comportamiento físico bajo ciertas condiciones, presentando ciertas características geométricas y materiales, lo que da pauta a resaltar ciertas consideraciones que se tienen que mencionar. La ausencia en el país de datos de pesaje dinámico WIM, encamina al uso del programa DEEFEP, para la simulación de escenarios de tráfico pesado con registros WIM franceses. Aunado a este hecho, la cultura de monitoreo para la salud de las estructuras es escaso, y el poco tratamiento que existe se concentra en edificaciones grandes y modernas para su seguimiento sísmico. Estos factores, son relevantes en esta investigación, además del tratamiento de señales y la programación del comportamiento de puentes de vanos de gran dimensión, variables en las que debe profundizarse.

Las cargas presentes en puentes se resumen en ciertos grupos: cargas gravitacionales, de viento, de sismo, de impacto y en cargas accidentales (Tang, 2017).

- Cargas gravitacionales: En ellas se incluye la carga viva debido a los trenes, vehículos, peatones o toda clase de objeto a la que esté destinado el flujo; además del peso muerto de los materiales y mobiliario incluido en el puente.
- Cargas de viento: El efecto del viento se vuelve más importante al aumentar el claro del puente. Es forzoso realizar un análisis del comportamiento de la estructura a causa de la corriente eólica. Hay evidencia de fuertes daños y colapsos en puentes debido al movimiento provocado por el viento a tal punto, que algunos han llegado a entrar en resonancia.

- Cargas sísmicas: El movimiento del terreno que genera desplazamientos en la estructura provoca esfuerzos no previstos en el análisis estático y se deben revisar esas diferencias para descartar fallas.
- Cargas de impacto: Pueden hacerse análisis de impacto (de parte de vehículos, trenes, embarcaciones) en puntos susceptibles de la estructura.
- Cargas accidentales: Las cargas no convencionales generalmente son específicas del proyecto debido a la exposición a algún agente ambiental (temperatura, agentes químicos), vibraciones, explosiones, pérdidas de resistencia en los materiales, etcétera.

La clasificación de puentes de acuerdo a su longitud difiere según la bibliografía, pero se distingue la categoría de grandes claros, o de tramo largo, cuando los apoyos se sitúan a una distancia mayor a 80 metros.

3.1 MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL

El Monitoreo de Salud Estructural, o SHM (*Structural Health Monitoring*), es la integración de un sistema de sensores, un sistema de obtención de datos, un sistema de procesamiento y archivo de datos, un sistema de comunicación y un sistema de detección y modelación de daños para obtener conocimiento de la integridad de las estructuras en servicio de forma continua. Los sistemas de monitoreo de salud estructural proveen oportunidades de observar distribuciones de esfuerzos y comportamiento por fatiga más realistas bajo excitaciones operacionales (Zhu *et al.*, 2015). El principal objetivo de este método es controlar la seguridad, la integridad y el rendimiento de una estructura.

El sistema global consiste en la colocación de sensores en puntos estratégicos a lo largo de la estructura para detectar la presencia y ubicación de algún daño generado como consecuencia de un sismo, evento impredecible o por su uso normal. El

monitoreo estructural nos permite cuidar las estructuras a largo plazo disminuyendo costos de mantenimiento y reparaciones.

El rápido desarrollo de la tecnología de sensores proporciona un sólido soporte técnico para el monitoreo de salud estructural y la evaluación de puentes de largo alcance. Las mediciones de tráfico son esenciales para la creación de modelos actuales de carga vehicular ya que las cargas vehiculares en un puente son aleatorias y localizadas en puntos específicos por naturaleza; además, la información del tráfico es útil en la simulación y predicción multiobjetivo de dichos modelos (Lu, Liu & Beer, 2018). El monitoreo de salud estructural en puentes de grandes claros tiene como fin el seguimiento de las condiciones de carga de servicio y el desempeño del puente bajo dichas condiciones, la actualización de normas de diseño, la detección de daño y su localización en algún elemento estructural (Zhou *et al.*, 2017), todo ello integrado con un objetivo final: la supervisión general de las estructuras de manera constante como acción preventiva y no destructiva. La medición en campo con sistemas de monitoreo de salud estructural provee una descripción actualizada del comportamiento de las estructuras cercana a valores reales y actualizados en cuanto a esfuerzos y deformaciones; además de un panorama de otros fenómenos como la influencia de la temperatura, vibraciones y otros agentes ambientales.

La única manera de obtener información precisa es a través de mediciones en campo, con sensores instalados a los elementos del puente para que las deformaciones sean medidas y los esfuerzos sean calculados (Ye *et al.*, 2014). La información de deformaciones por monitoreo da pie a la evaluación de los elementos críticos en estructuras reales bajo condiciones operacionales (Deng *et al.*, 2015) ya que las señales puntuales de tráfico proporcionan una enorme cantidad de datos para modelar la carga viva en puentes en servicio. Con la aplicación de sistemas continuos de monitoreo de salud estructural en tiempo real se detectan a tiempo

anomalías que sugieren un daño presente y un pronto colapso, dando lugar a decisiones de prevención en tiempo que salven vidas (Xu & Xia, 2012).

El monitoreo estructural es esencial en la evaluación del estado actual y comportamiento de los puentes de acero en cuanto a agrietamientos por fatiga. Gracias al uso de registros de galgas de deformación producto de los sistemas de monitoreo en puentes sujetos a condiciones de tráfico normales, es posible el conocimiento de la distribución de esfuerzos, esfuerzos locales y comportamiento actual del puente.

En cuanto a los esfuerzos locales, el uso de información de galgas extensométricas comprueba que las deformaciones transversales en la cubierta de los puentes son principalmente causadas por la huella del neumático al circular la carga, e incluso no hay diferencia comparable con los esfuerzos estáticos o dinámicos a la mitad del claro de la sección de puente de losa ortótropa (Teixeira de Freitas & Kolstein, 2012).

3.2 SOFTWARE DEEFEP

El software Diagnóstico Estadístico, Efectos de Fatiga y Extremos en Puentes, creado en el área de estructuras de la Universidad Autónoma de Querétaro (2011 – actualidad), tiene como objetivo predecir la vida útil de los puentes, contemplando las líneas y superficies de influencia del tráfico simultáneamente en varios carriles, simulando escenarios de tráfico pesado gracias a registros de pesaje en movimiento (WIM). También tiene la opción de evaluar la vida útil por fatiga en los cables presforzados de las vigas de los puentes.



Figura 2. Interfaz DEEFEP

Incluso, este software tiene integrado un módulo de fatiga con agrietamiento parcial que provoca un aumento de esfuerzos en los cables de acero presforzado. Este programa calcula también los efectos extremos de cargas, que provocan que la estructura llegue a su límite (capacidad última).

3.3 TRATAMIENTO DE SEÑALES

Es el conjunto de técnicas que procesan (amplifican o filtran), así como analizan y clasifican las señales. Es la aplicación de una serie de operaciones lógicas y matemáticas a un conjunto de datos provenientes de una señal, y todo ello mediante la ayuda de un ordenador.

Se requieren dispositivos (sensores) capaces de leer las señales. Después, se necesita traducir estas señales brindadas por los sensores en señales eléctricas. Esto es lo que se realiza mediante un transductor. Además, si la señal es analógica, es decir, continua en el tiempo y en amplitud, se requiere digitalizar la señal para tener un conjunto de valores numéricos cada determinado intervalo de tiempo,

también llamado frecuencia de muestreo, que se podrán registrar en un ordenador para poder procesarse convenientemente.

Los programas procesadores de señales contienen algoritmos, las fórmulas matemáticas que describen cómo se debe manipular la señal para conseguir el objetivo propuesto. Algunas de las principales aplicaciones del procesamiento de señal son, por ejemplo, el procesamiento de señales de audio, el procesamiento de imágenes digitales, la compresión de vídeo, el procesamiento del habla, el reconocimiento de voz, las comunicaciones digitales, el radar, la sismología y la biomedicina.

En señales de deformación, las mediciones de los sensores se ven afectadas por múltiples factores. La corrección de las alteraciones de la medida verdadera forma parte del tratamiento de señales.

3.4 REGISTROS DE EXTENSÓMETRO

Para medir el historial de carga de una estructura, transductores u otros sensores se colocan en puntos críticos de los elementos estructurales, los cuales se identifican a partir de otro tipo de instrumentos (por ejemplo, líneas de influencia a partir de sistemas WIM), pruebas experimentales o análisis de modelos computacionales (MEF). La representación tiempo-frecuencia es llevada a cabo para señales debido a cargas estáticas; en cambio, para cargas de tráfico (dinámicas), se efectúa la medición de desplazamientos verticales y deformaciones en elementos estructurales (Kamnik *et al.*, 2015).

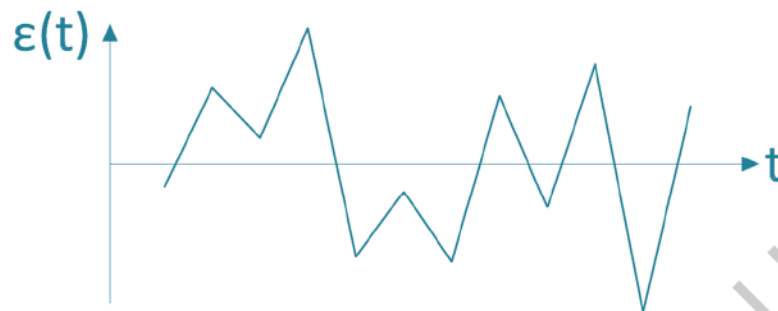


Figura 3. Registro de deformaciones

3.4.1 GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

Los sistemas de monitoreo de salud estructural han mostrado una descripción del comportamiento de las estructuras apegado a lo que realmente está ocurriendo en los elementos donde se instrumenta, a tal grado, que para diseños de estructuras contemporáneas importantes es una herramienta frecuentemente utilizada. Un ejemplo de estos sistemas son las galgas de deformación o galgas extensométricas, cuyo objetivo principal es la medición de deformaciones elásticas que, generalmente, se relacionan con los esfuerzos en los especímenes.

Las galgas extensométricas son sensores cuya resistencia varía con la fuerza aplicada. Estos sensores convierten la fuerza, presión, tensión, peso, entre otras, en un cambio de la resistencia eléctrica el cual puede medirse. Cuando se aplica una carga a la superficie, el cambio resultante en la longitud de esta, se refleja en la resistencia; sin embargo, debe existir una estrecha relación entre la galga y el espécimen de estudio. Las mediciones de este tipo de sensores son de tres tipos: estáticas, dinámicas (acciones de rápida variación) y mixtas.

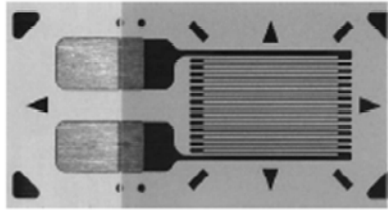


Figura 4. Galga extensométrica para medición de deformaciones

La deformación correspondiente se mide en términos de la resistencia eléctrica del metal utilizado, que varía linealmente con la tensión. La lámina y el agente de adhesivo deben trabajar juntos en la transmisión de la presión. Los materiales ideales para medir la presión, son también los más sensibles a las variaciones de temperatura y tienden a cambiar la resistencia a medida que envejecen. Para pruebas de corta duración, esto puede no ser una preocupación seria, pero para la medición continua, se debe considerar la compensación de la temperatura. Muchas veces, para acondicionar el sensor, se realizan configuraciones de circuito, predominantemente el denominado puente de Wheatstone, el cual permite la determinación de una resistencia a partir de otra conocida o la medición con exactitud de los cambios relativos en la resistencia (del orden de entre 10^{-4} y $10^{-2} \Omega/\Omega$) y tiene la ventaja de trabajar con corriente alterna o continua, encontrando el desequilibrio de la tensión en el sistema. Las configuraciones del circuito de Wheatstone se realizan según la cantidad de galgas activas en un cuarto, medio o puente completo y, para cada caso, existen diversas opciones para la compensación de temperatura y anulación de ciertos elementos mecánicos; existen incluso, configuraciones inclinadas de puente completo para mediciones de torsión (véase anexo A). No obstante, la afectación de las mediciones es resultado de diferentes efectos como lo son: resistencia del cable, dilatación, humedad y fluencia del adhesivo; sin embargo, este estudio está enfocado en la corrección de los efectos por temperatura (incluida la dilatación) que se presentan en la sección 5.3.1.

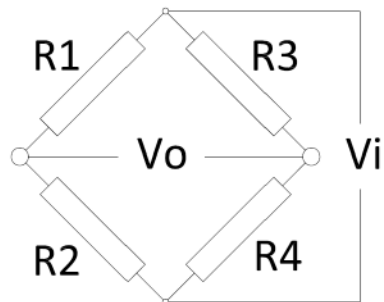


Figura 5. Puente de Wheatstone

El principio de funcionamiento de las galgas extensométricas se basa en la resistencia piezoeléctrica de los materiales del dispositivo, relacionando el cambio de longitud (l) con la fuerza aplicada (P) expresada por la ley de Hooke en el intervalo elástico del material, y por tratarse de galgas unidireccionales, como sigue:

$$\sigma = \frac{P}{A} = E \varepsilon = E \frac{dl}{l} \quad (1)$$

Para el acero estructural, se considera un módulo de Young E de $2.1 \cdot 10^5$ MPa.

El cambio de la resistencia eléctrica en el dispositivo (R) se expresa generalmente por el factor de galga (k), determinada por el fabricante a través de estudios experimentales de las características de la serie de producción de las galgas de deformación.

$$k = \frac{dR/R}{\varepsilon} \quad (2)$$

Este factor expresa la relación entre la deformación y el cambio de resistencia eléctrica; por tanto, es la propiedad más importante de este tipo de extensómetros.

La variación de este factor con el cambio de temperatura es cercana a $0.1\%/10^{\circ}\text{C}$ por lo que comúnmente se desprecia en el cálculo de la deformación real.

Por lo anterior, las galgas extensométricas son utilizadas en la medición de deformaciones longitudinales del material al que se instrumenta; sin embargo, deben de tenerse en cuenta las condiciones en que se instala el sensor para entender los resultados que éste arroja y saber si existe la necesidad de acondicionar dichas mediciones.

Cabe mencionar que las deformaciones en otras direcciones generan perturbaciones a las mediciones; para el caso de puentes, las deformaciones predominantes son causadas por el tráfico que circula longitudinalmente por la estructura. Por lo anterior, las galgas extensométricas son dispositivos adecuados para la medición de deformaciones y esfuerzos elásticos que se colocan transversalmente a la dirección del puente cuando lo que se busca son los esfuerzos que provocan el agrietamiento en el material, lo que ocurre por ejemplo, con una losa ortótropa en la junta de la cubierta de acero con las artesas longitudinales.

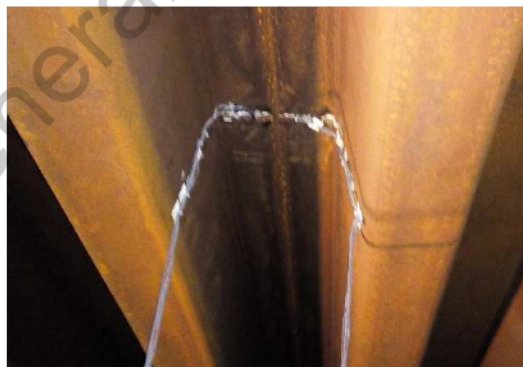


Figura 6. Instrumentación de galgas de deformación en puente de Normandía

3.4.2 OTROS EXTENSÓMETROS

Una variante como dispositivo que mide deformaciones es el sensor de fibra óptica. Su versatilidad en medición de magnitudes físicas es una gran ventaja, ya que como transductor puede medir desplazamientos, aceleraciones y temperatura. Otras grandes ventajas son la capacidad de medir diferentes puntos a lo largo de su longitud y la inmunidad al ruido eléctrico. Su funcionamiento se basa en la propagación de la luz a través de un tubo compuesto de un revestimiento y un núcleo comúnmente de fibra de vidrio o plástico (figura 7). El haz de luz proviene de una fuente que si pasa sin sufrir pérdidas, se dispersa a 60° hacia el objeto.



Figura 7. Configuración de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica pueden ser reflectivos o de barrera. Los sensores de barrera cuentan con un transmisor y un receptor; mientras que los primeros vienen en una sola unidad y pueden tener configuración, según su sección transversal, en paralelo, coaxial o separado.

Además de la fibra óptica, existen también sistemas microelectromecánicos (MEMS) formados por circuitos integrados microscópicos. Estos sistemas consisten en sensores y actuadores colectivos, trabajando como transductores capaces de convertir un tipo de energía a otra forma (Jan *et al.*, 2014). La confiabilidad de estos dispositivos ante fatiga es importante, ya que la fatiga es determinante en la vida útil

de los dispositivos. Dicha confiabilidad se estudia desde la perspectiva de mecánica de la fractura y se modela estadísticamente con funciones de distribución y la ley de Paris.

Los MEMS son una tecnología prometedora debido a su tamaño y fabricación en serie, pero es limitada por la dificultad de proveer una minúscula fuente de poder, aunque, por lo mismo, consumen poca energía.

3.5 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

El esfuerzo, en una estructura, es una medida de la fuerza por unidad de área que actúa en un plano que pasa por el punto de interés en un cuerpo. El análisis de esfuerzos brinda el panorama del comportamiento de un cuerpo de cierto material al someterse a un sistema de cargas. Por lo que gracias a dicho análisis, es posible saber si un elemento se esfuerza de tal manera que puede presentar deformaciones no deseadas o estar en riesgo de colapso. El espectro de esfuerzos de una señal se deriva al sustraer los ciclos de dicha señal con un método conveniente. También se obtiene un espectro de esfuerzos a partir de experimentación o simulaciones comúnmente por el método de elementos finitos (FEM).

El método de elementos finitos es el más utilizado para describir el análisis de esfuerzos al realizar la discretización los cuerpos objetos de estudio. No obstante, el creciente uso de sistemas de sensores para el monitoreo de salud estructural ha hecho que las técnicas analíticas sean desafiadas por dispositivos que, si bien registran señales contemplando todos los efectos que pueden presentarse en la estructura al instante, difieren de modelos analíticos en los que se suponen y obvian ciertas consideraciones. De ahí las importantes diferencias entre los resultados que de ambos estudios emanen, siempre y cuando las mediciones en campo se hayan llevado a cabo adecuadamente, por lo que el acondicionamiento del dispositivo y el procesamiento de la información resultan ser de importante relevancia.

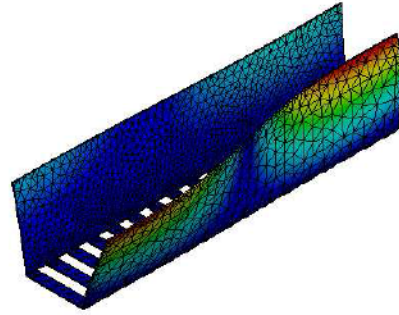


Figura 8. Análisis de esfuerzos en puente metálico con modelo de elementos finitos

En el análisis estructural, existen concentraciones de esfuerzos al haber huecos, discontinuidades o muescas que, geoméricamente, aglutinan esfuerzos en sus contornos que pueden llegar a ser hasta tres veces mayores a los esfuerzos promedio (Saviotti, 2014).

Por esta razón es común que, al existir cargas cíclicas variables, haya puntos críticos (*Hot Spots*) donde los esfuerzos pasen de compresión a tensión y viceversa, provocando “microgrietas” en el material debido a amplitudes de esfuerzo mayores a la media esperada. Es en estos puntos donde se puede presentar una ruptura, al propagarse la falla por la consecución de las cargas.

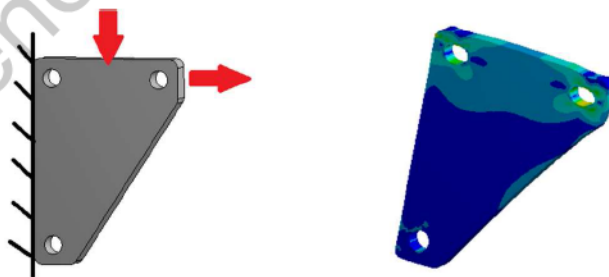


Figura 9. Análisis de esfuerzos en pieza de conexión con concentración de esfuerzos en cercanías de huecos

3.6 ANÁLISIS DE FATIGA EN PUENTES

La fatiga es el proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un material sujeto a tensiones y deformaciones variables en algún punto o puntos y que produce grietas o la fractura completa tras un número suficiente de fluctuaciones (ASTM E-1823). La falla por fatiga, según Saviotti (2014), se define como el número de ciclos y, a su vez, el tiempo necesario que transcurre para alcanzarse un criterio predefinido o un umbral.

La predicción de la vida útil en elementos mecánicos se reduce al uso de tres principales modelos:

- Enfoque S-N: Utiliza el esfuerzo nominal relacionado a la resistencia a la fatiga de elementos lisos y huecos, a través de curvas de esfuerzo versus número de ciclos. Desde esta perspectiva, no importa el orden en que los ciclos ocurren y se tiene la curva experimental S-N que describe el comportamiento en fatiga del material, el cual ha de compararse con la estructura del mismo material en cuestión. Esta perspectiva no distingue entre el inicio y propagación de la grieta, pero toma en cuenta la vida total para que falle un elemento.
- Enfoque ϵ -N: Utiliza la deformación local relacionado a la resistencia a la fatiga de elementos lisos y huecos, a través de curvas de esfuerzo versus número de ciclos. Se aplican modelos analíticos para comprobar las deformaciones y/o esfuerzos.
- Crecimiento de grieta: Se aborda el problema desde la mecánica de la fractura, obteniendo un comportamiento detallado de la estructura desde el inicio de la aparición de la grieta, su propagación y hasta llegar al colapso. La ecuación por excelencia para el crecimiento de grieta es la Ley de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (3)$$

Donde:

$\frac{da}{dN}$ = Incremento de longitud de grieta por ciclo de fatiga

C, m = Constantes del material, obtenidas experimentalmente

ΔK = Variación del factor de intensidad de esfuerzos, definida según Broek (1986) como:

$$\Delta K = S Y(a) \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

Donde:

S = Rango de esfuerzos

$Y(a)$ = Función de la geometría de la grieta

En adición, el uso conjunto de los modelos anteriores se puede realizar para una perspectiva detallada del fenómeno de fatiga en el objeto de estudio.

El fenómeno de fatiga se estudia también, según la variabilidad de sus cargas. Por tanto, el caso simple y que es común encontrar en análisis de piezas mecánicas es el que presenta carga constante, por lo que no es necesario un método de conteo de ciclos que resuma las diferentes amplitudes de esfuerzo, algo que sí ocurre al someterse una estructura a cargas cíclicas variables; por ejemplo, al circular vehículos de diferente tonelaje por un puente.

Los fallos por fatiga en la generalidad de las estructuras se producen en tres fases:

Fase 1 (Iniciación): Una o más grietas se desarrollan en el material. Las grietas pueden aparecer en cualquier punto del material, pero en general ocurren alrededor de alguna fuente de concentración de tensión y en la superficie exterior donde las fluctuaciones de tensión son más elevadas. Las grietas pueden aparecer por muchas razones: imperfecciones en la estructura microscópica del material,

ralladuras, arañazos, muescas y entallas causados por las herramientas de fabricación o medios de manipulación. En materiales frágiles el inicio de grieta puede producirse por defectos del material (poros e inclusiones) y discontinuidades geométricas.

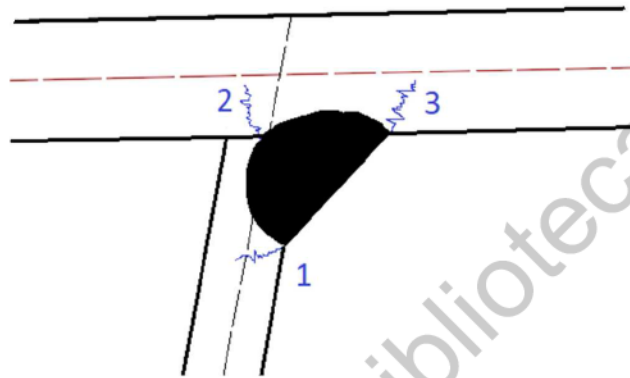


Figura 10. Puntos susceptibles de inicio de grieta en soldadura artesana-placa

Fase 2 (Propagación): Algunas o todas las grietas crecen por efecto de las cargas. Además, las grietas generalmente son finas y de difícil detección, aun cuando se encuentren próximas a producir la rotura de la pieza.

Fase 3 (Rotura): La pieza continúa deteriorándose por el crecimiento de la grieta quedando tan reducida la sección neta de la pieza que es incapaz de resistir la carga desde un punto de vista estático produciéndose la rotura por fatiga.

El desempeño por fatiga de los puentes de acero depende de múltiples factores, como son: historial de tráfico, características de materiales, agentes externos que están sujetos a la localización de la estructura (exposición a corrientes de viento, oleaje, fuego, entre otros) que generan incertidumbre en el comportamiento estructural durante la vida de servicio del puente (Ye *et al.*, 2014). Es realmente importante evitar discontinuidades geométricas locales, que eviten al mismo tiempo

concentraciones de esfuerzos y, así, se prolongue la vida útil de los elementos estructurales.

Algunas partes de máquinas, mecanismos, así como elementos arquitectónicos y estructurales están sometidos a cargas que varían con el tiempo en el proceso de operación. El análisis de esfuerzos de los problemas con este tipo de carga difiere del análisis de las cargas estáticas y de impacto. Los puentes están sometidos constantemente a cargas diferentes en el tiempo, por lo que son objeto de esfuerzos producidos por cargas variables. El hecho de que se tengan sistemas constructivos, por ejemplo puentes de losa ortótropa, donde los elementos soportantes de las cargas presentan geometrías delgadas o pequeñas contra lo que circula a través, o por encima, de ellas produce que en este tipo de estructuras se presente el fenómeno de fatiga. Dichos sistemas constructivos suelen utilizarse para la construcción de puentes de grandes claros, donde existen placas portantes y elementos que abundan en rigidez al sistema en sentido transversal y longitudinal (diafragmas y dovelas, por ejemplo).

La caracterización de la fatiga en puentes carreteros, mediante el análisis de alto número de ciclos de esfuerzos, es lo más adecuado cuando la estructura está sometida a una constante variación de cargas, como ocurre con el tráfico vehicular (Bárcenas, 2011).

La evaluación por fatiga no es aplicable a puentes peatonales, puentes portantes de canales u otros puentes que estén predominantemente cargados, a menos que dichos puentes o partes de ellos estén expuestos a excitarse por cargas de viento o peatonales. Tampoco es aplicable a partes de vías ferroviarias o caminos que no son esforzados por cargas de tráfico ni por fuerzas de viento (EN-1993-2, Cap. 9. 2003).

Kużawa *et al.* (2018) proponen la siguiente metodología para el manejo de la evaluación de puentes, según códigos y recomendaciones europeos, todo ello con el objetivo de dar un tiempo de vida residual del puente objetivo. Esta metodología consta de tres fases concatenadas que se van acomplejando para dar una descripción más completa y refinada según la necesidad del proyecto.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

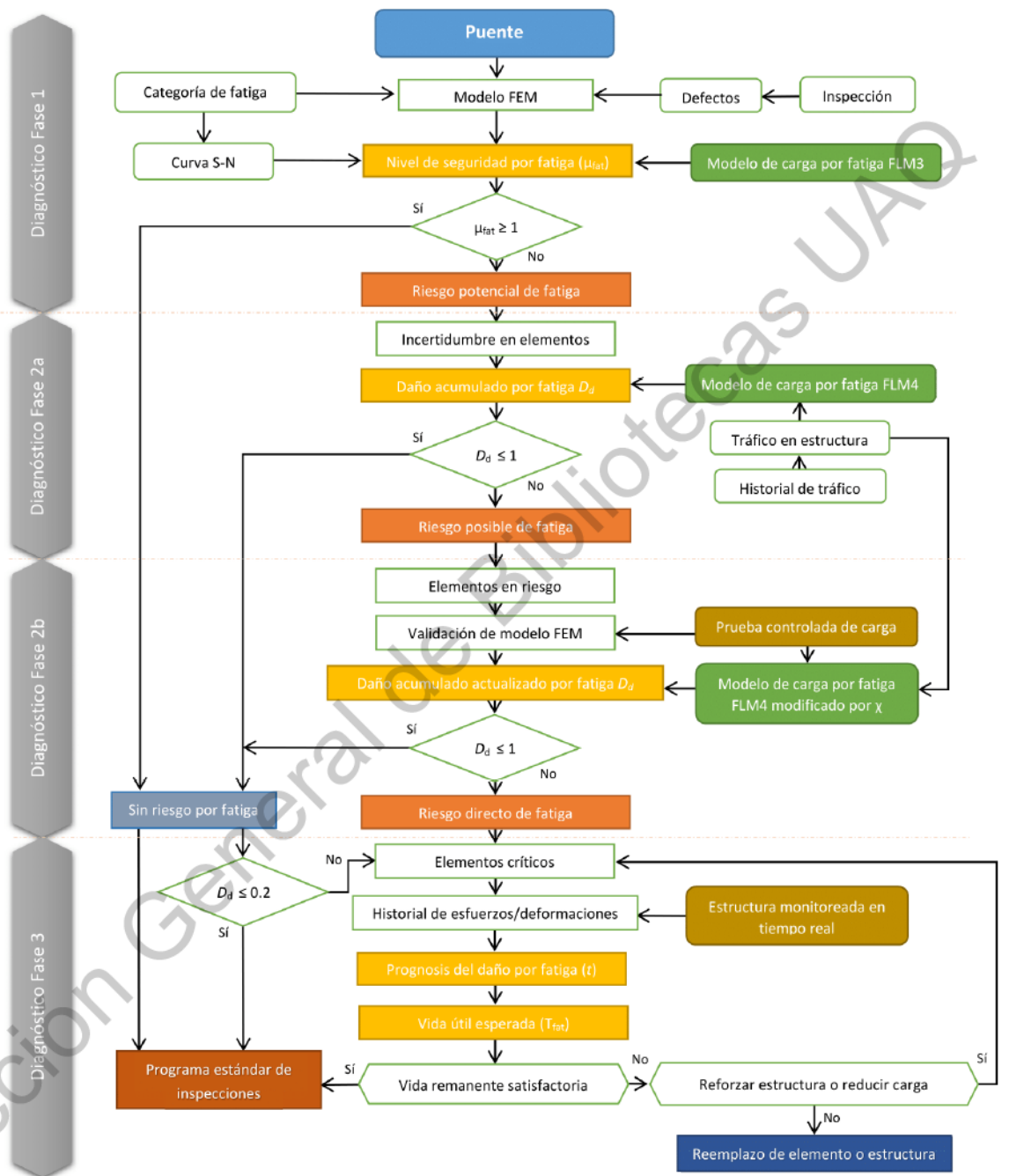


Figura 11. Esquema general del diagnóstico por fatiga de puentes de acero en la gestión de puentes. Fuente: Kuźawa *et al.* (2018)

En cuanto a puentes de acero con losa ortótropa (comúnmente utilizada en puentes de grandes claros); es bien sabido que la parte crítica está relacionada a la resistencia a la fatiga en las juntas de soldadura entre la placa y las dovelas (viguetas longitudinales); las mediciones de galgas extensométricas son una herramienta importante para el mejor conocimiento del complejo campo de esfuerzos en el tablero del puente (De Backer *et al.*, 2007), además los cálculos con elemento finito pueden validar la precisión de dichas mediciones.

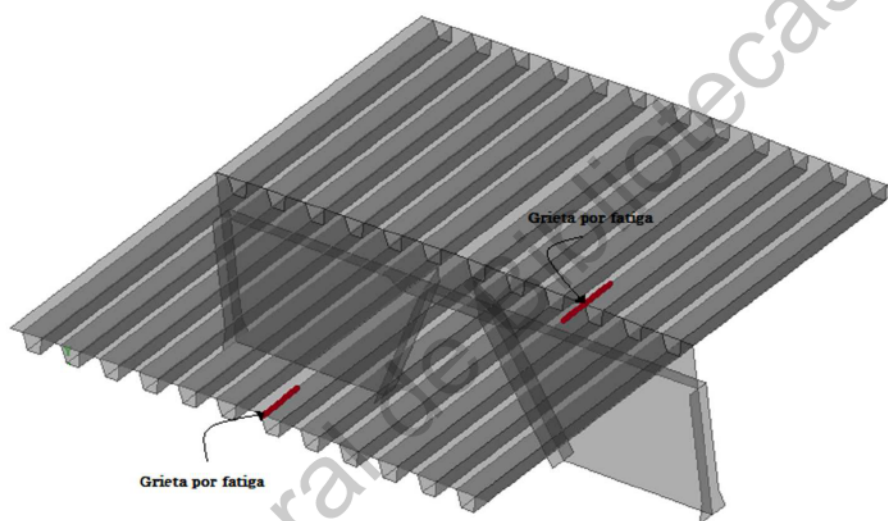


Figura 12. Vulnerabilidad de losa ortótropa a fisuras por fatiga.

3.6.1 REGLA DE PALMGREN-MINER

También llamada regla de Miner o regla de daño lineal. Es la primera teoría de daño acumulado, propuesta por Palmgren en 1924 y desarrollada por Miner en 1945. Es la más utilizada en fatiga, sobre todo en máquinas, por su sencillez.

El análisis de fatiga se basa en la regla de Miner de daño acumulado para estimar la vida a fatiga a partir de una historia de esfuerzos o deformaciones. La estimación se realiza reduciendo los datos de carga a una secuencia de picos y valles, contando los ciclos y calculando la vida a fatiga. Para realizar un análisis a fatiga o de durabilidad, se debe proporcionar información específica para el análisis de fatiga:

- Propiedades a fatiga de los materiales
- Variación de las cargas a fatiga
- Opciones de análisis a fatiga

El modelo de Miner se expresa como sigue:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (5)$$

Donde:

D = Daño por fatiga (si es 1 se considera que el elemento colapsa por fatiga);

n_i = Número de ciclos sometidos al esfuerzo S_i ;

N_i = Número de ciclos para ruptura (siguiendo la curva de Wöhler);

S_i = Esfuerzo sometido.

3.6.2 CURVAS S-N (DE WÖHLER)

El mecanismo de falla por fatiga es una consecuencia de la consecución de carga y descarga y, según el número de ciclos, se clasifica en dos: en fatiga de alto ciclo, o *High Cycle Fatigue*, (Ciclos mayores a 10^4) y oligofatiga, fatiga de bajo ciclo

o *Low Cycle Fatigue* (menor a 10^4 ciclos). La fatiga en puentes se considera un fenómeno de alto ciclaje y con deformaciones en el rango elástico, debido al constante tráfico de vehículos, por lo que el análisis se hace con respecto a la curva S-N; a diferencia del análisis de bajo ciclo, donde grandes deformaciones se presentan, inclusive llegando a deformaciones plásticas, para la cual se requiere la curva ϵ -N.

La Curva S-N de un material define valores de esfuerzos alternos contra el número de ciclos requeridos para causar el fallo a un determinado grado de esfuerzo. Para cada material se pueden definir múltiples curvas S-N con diferentes valores de tensión media. Estas curvas se obtienen a través de ensayos en laboratorio, por lo general utilizando una probeta sometida a tensiones cíclicas de gran amplitud (aproximadamente dos tercios de la resistencia a tensión del elemento).

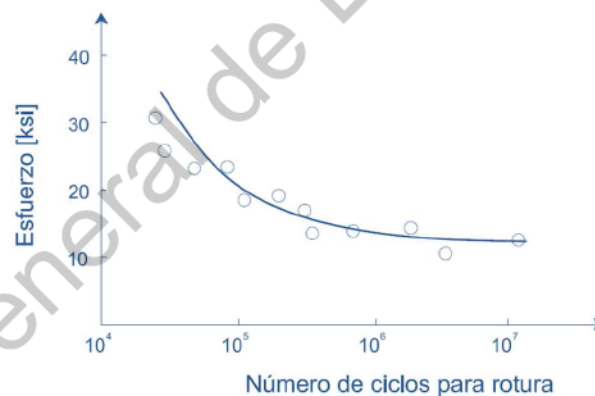


Figura 13. Ejemplo de determinación de curva S-N con pruebas de laboratorio

En el caso de puentes de acero, la curva S-N representa la relación entre el rango de tensiones $\Delta\sigma$ en un detalle específico (especificados en el código europeo, anexo E) y el número total de ciclos hasta el fallo, N. En otras palabras, un detalle específico con cierta resistencia a la fatiga (representado por una curva S-N) fallará después de N ciclos de un rango de tensiones $\Delta\sigma$.

Al ocurrir la falla, la vida de fatiga se consume y el daño de fatiga total en los detalles será entonces del 100%, o $D = 1,0$. Si el mismo detalle ahora se carga con una serie de ciclos de tensión $n < N$ en el mismo rango de esfuerzo, el daño por fatiga en el detalle sería entonces el representado por la siguiente relación:

$$D = n/N \quad (6)$$

Al tomar en cuenta todos los rangos de esfuerzo, estamos hablando del daño acumulado con la regla de Miner, índice en la toma de decisiones en el mantenimiento de estructuras.

3.6.3 ALGORITMO DE *RAINFLOW*

El método de conteo de ciclos de *Rainflow* se utiliza en el análisis de datos de fatiga para reducir un espectro de esfuerzo variable en un conjunto de reversiones de esfuerzos simples. Su importancia es que permite posteriormente la aplicación de la regla de Miner para evaluar la vida de fatiga de una estructura sujeta a cargas complejas.

El algoritmo de *Rainflow*, creado por M. Matsuishi y T. Endo, es el método más usado en el conteo de ciclos de esfuerzos, debido a que describe la manera en que los ciclos de histéresis se presentan en un elemento, a través de las curvas de esfuerzo-deformación.

t	σ	ϵ
1	8	0.086
2	-4	0.014
3	5.4	0.062
4	-8	-0.086
5	6.4	0.03
6	-4	-0.024
7	2	0.004
8	-6	-0.046
9	8	0.086

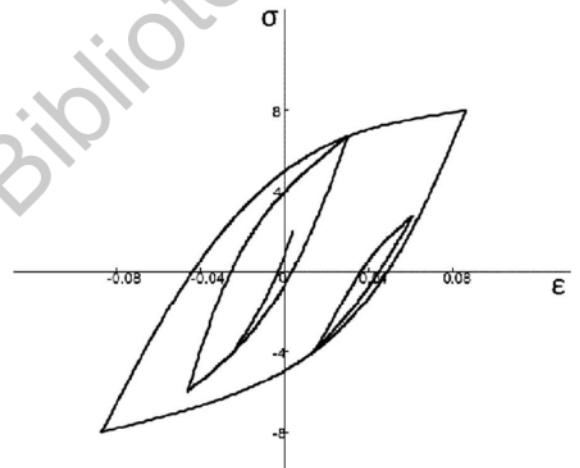
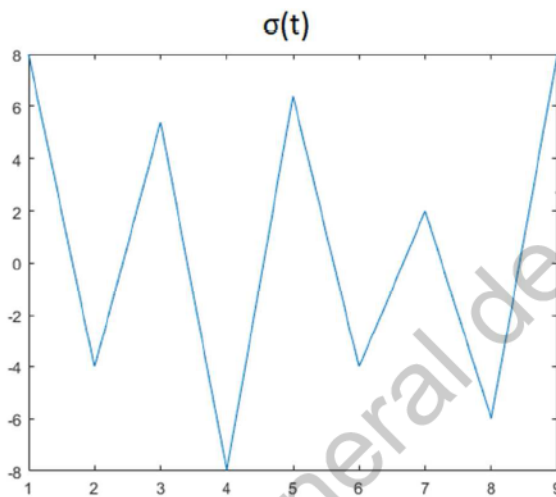
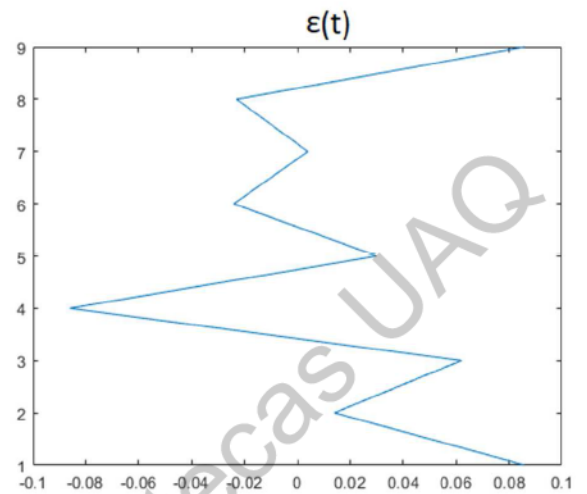


Figura 14. Históricos de deformación y esfuerzo y ciclos de histéresis correspondientes

Para el uso de dicho algoritmo es necesario tener en cuenta las siguientes instrucciones:

- Se representa la curva Tiempo contra Esfuerzo, con el eje de tiempo en sentido vertical y creciente hacia abajo; mientras que los esfuerzos como abscisas (tensión a la derecha y compresión a la izquierda del origen,

respectivamente). Por tanto, se tiene una configuración presentada con picos y valles con forma de pagoda, de donde viene el antiguo nombre del método.

- Se elige un punto de origen de esfuerzo al azar, el cual se ubica en el eje de las abscisas en un pico de esfuerzo a tensión máxima.

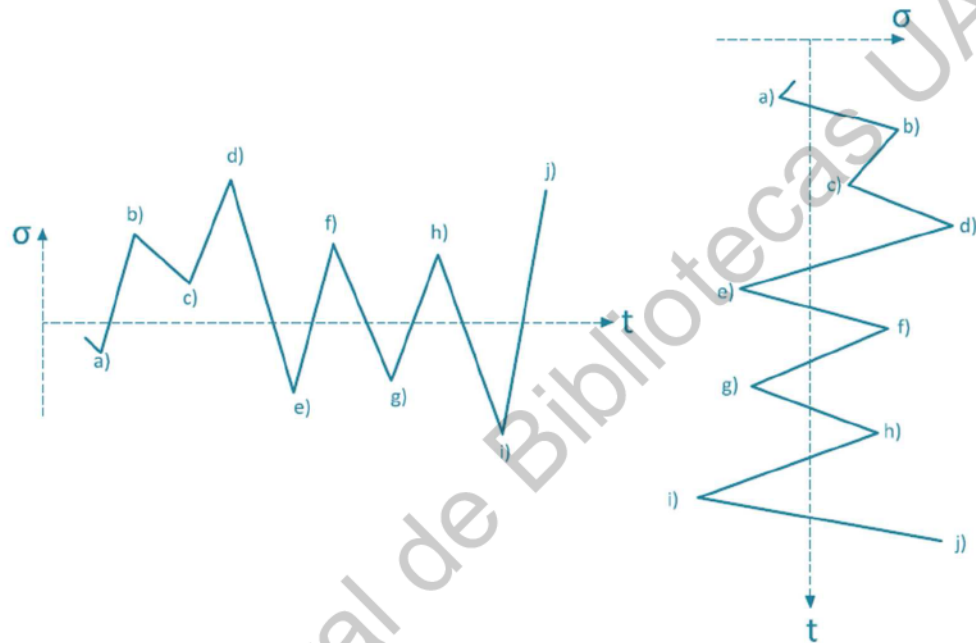


Figura 15. Concepción del Método de *Rainflow*

Se contempla que las partes superiores de los techos están a la derecha del eje; los fondos de los techos están a la izquierda.

Si la caída del flujo, suponiendo una gota, comienza desde un pico:

1. La caída se detendrá si se encuentra con un pico opuesto mayor que el de salida,
2. También se detendrá si se encuentra con la ruta atravesada por otra caída, previamente determinado.

3. La caída puede caer sobre otro techo y continuar deslizándose de acuerdo a las reglas 1 y 2.

Si la caída comienza desde un valle:

4. La caída se detendrá si la caída se encuentra con un valle más profundo que el de salida.
5. La caída se detendrá si cruza el camino de una caída proveniente de un precedente valle.
6. La gota puede caer sobre otro techo y continuar de acuerdo con las reglas 1 y 2.

La longitud horizontal de cada flujo de “lluvia” define un rango que puede considerarse como equivalente a un semicírculo de una carga de amplitud constante.

3.7 NORMATIVA Y PRÁCTICAS SOBRE EL ANÁLISIS DE FATIGA

El código europeo tiene establecidos los criterios para el análisis de fatiga desde el enfoque S-N, así como tiene estipulados diferentes modelos de carga para hacer el cálculo de daño por fatiga. Además, el Centro Común de Investigación europeo (JRC) sienta las bases de una evaluación estructural para los puentes, así como colabora con otras recomendaciones técnicas. La ASTM proporciona la metodología para el conteo de ciclos por el método de *Rainflow*. Por último, la normativa china (*GB Standards*) tiene una normativa específica para el monitoreo de salud estructural.

3.7.1 EUROCODE CAPÍTULO 3

Los Eurocódigos Estructurales comprenden un grupo de normas para el proyecto estructural y geotécnico de edificios y obras de ingeniería civil. Existen 10 Eurocódigos Estructurales, desde la EN 1990 a EN 1999, divididos a su vez en diferentes partes y subpartes.

El origen de los Eurocódigos se encuentra en los trabajos desarrollados por la propia Comisión Europea para redactar unos documentos que permitieran establecer reglas técnicas armonizadas a nivel comunitario para el diseño y proyecto de las obras de edificación y de ingeniería civil. Estas reglas deberían servir de alternativa a las reglas establecidas en cada uno de los Estados miembros y que finalmente, las sustituyese.

Para el Eurocódigo 3, como conjunto de normas europeas que recoge las reglas y principios para el cálculo de estructuras de acero, se pretenden los siguientes objetivos: acercar los nuevos métodos de dimensionamiento y cálculo a los profesionales; contribuir a la transparencia y entendimiento entre usuarios, propietarios, proyectistas, constructores y fabricantes de productos de construcción; desarrollar metodologías y programas informáticos que permitan a proyectistas y fabricantes aumentar su competitividad y disminuir sus costes. En definitiva se pretende la eliminación de las barreras técnicas al comercio y la armonización de especificaciones técnicas.

El Eurocódigo 3 se divide en dos partes: la primera, consiste en reglas generales para el diseño de estructuras de acero, sobre todo da un panorama sobre las reglas a seguir para edificaciones; la segunda, trata del diseño de puentes de acero y algunos elementos de concreto armado (tema explícito en EN 1994).

El desarrollo de la norma EN 1993-2 sigue el siguiente esquema:

- Generalidades
- Bases de diseño
- Materiales
- Durabilidad
- Análisis estructural
- Estados límite últimos

- Estados límite de servicio
- Conexiones atornilladas, conexiones soldadas, uniones y juntas
- **Evaluación por fatiga**
- Diseño asistido por pruebas

El apartado EN-1993-2 sobre la evaluación por fatiga en el diseño de puentes de acero se explican las condiciones para la no aplicación de este fenómeno: La evaluación por fatiga no es aplicable para puentes peatonales, puentes portantes de canales u otros puentes cargados estáticamente, por lo general, ni para partes de vías férreas o puentes ferrocarrileros que no son excitados por el tráfico ni cargas de viento. Además, los métodos propuestos por el código europeo no toman en cuenta los efectos de la temperatura.

Además, en el código EN-1991-2 de acciones en las estructuras, apartado de cargas de tráfico en puentes explica los conceptos básicos referentes a cada elemento de la vía de tránsito: componentes de seguridad como señalamientos, barreras, parapeto, barandales; componentes de circulación; conceptos de vehículos (automóvil, camiones). Lo que refiere a fatiga, se tratan los modelos de carga, en específico los cinco modelos de carga por fatiga.

El primer modelo de carga por fatiga consiste en un sistema tándem (dos ejes con dos cargas concentradas) con Q_{ik} de carga por eje o por una carga uniformemente distribuida q_{ik} en las partes desfavorables de la superficie de influencia; el segundo modelo consiste en un arreglo de camiones "frecuentes" idealizado; el tercer modelo es un vehículo de cuatro ejes con 120 KN por eje con dimensiones específicas; el cuarto modelo de carga consta de camiones "estándar" para los caminos europeos; el último modelo de carga consiste en la aplicación directa de información de tráfico, proyectada estadísticamente. La representación gráfica de los primeros cuatro modelos de carga por fatiga se muestra en el anexo B. Además existen consideraciones de la difusión de carga a 45° a través del pavimento flexible hacia

la estructura y la distribución de la figura 16 para la posición de los neumáticos respecto al centro del carril.

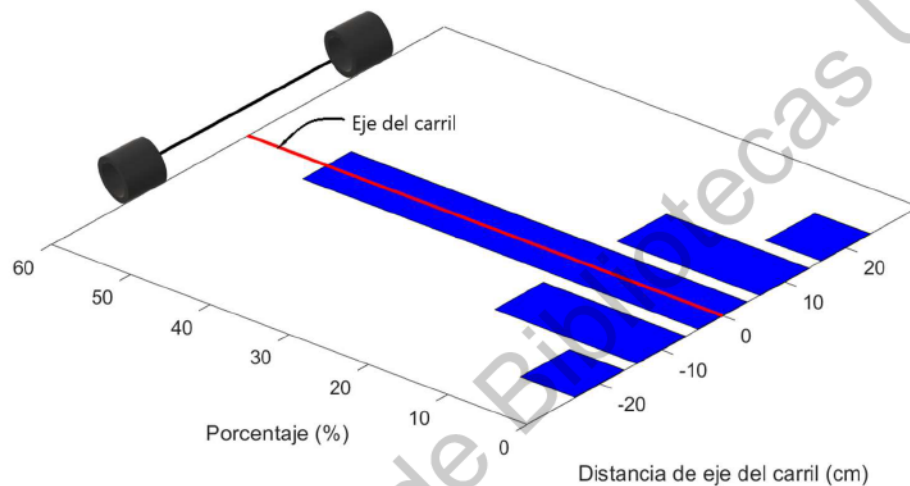


Figura 16. Distribución de la posición transversal vehicular

3.7.2 JRC: Assessment of Steel Structures

El Centro Común de Investigación (*Joint Research Center*) de la Unión Europea, tiene como objetivo proporcionar apoyo técnico y científico, haciendo recomendaciones acerca del desarrollo, diseño, aplicación y monitoreo de las políticas de la UE, así como sienta las bases para lo expedido por el código europeo (Eurocode). En cuanto a estructuras civiles, existen las recomendaciones para la estimación de la vida remanente por fatiga de estructuras de acero existentes. (EUR 23252 EN – 2008), donde se expone el procedimiento formado por cuatro fases:

- **Evaluación Preliminar:** Consiste en usar métodos simples para la identificación de elementos críticos, así como la revisión de los documentos disponibles del proyecto, verificados con la ayuda de una inspección visual

de la estructura. Con ello deben de intentarse resolver las dudas respecto a la seguridad del puente, comprobar la correspondencia entre planos y ejecución, remarcar modificaciones y reportar algún testigo de daño o alteración (grietas, rupturas de soldaduras o elementos, deslizamiento en conexiones atornilladas, entre otras). En esta fase, puede calcularse el nivel de seguridad, con los detalles utilizados en el cálculo de daño por fatiga de la manera que sigue:

$$\mu_{fat} = \frac{\Delta\sigma_c/\gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff}\cdot\Delta\sigma_{E,2}} = \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Ff}\cdot\gamma_{Mf}\cdot\Delta\sigma_{E,2}} \quad (7)$$

Donde:

μ_{fat} es el nivel de seguridad por fatiga,

$\Delta\sigma_{E,2}$ es la amplitud de esfuerzo constante equivalente para dos millones de ciclos,

$\Delta\sigma_c$ representa la resistencia por fatiga a dos millones de ciclos (categoría de detalle, véase 3.6.2 y Figura 17),

γ_{Ff} es el factor parcial de seguridad para la amplitud de esfuerzo constante equivalente $\Delta\sigma_{E,2}$,

γ_{Mf} denota el factor parcial de seguridad para la resistencia por fatiga $\Delta\sigma_c$.

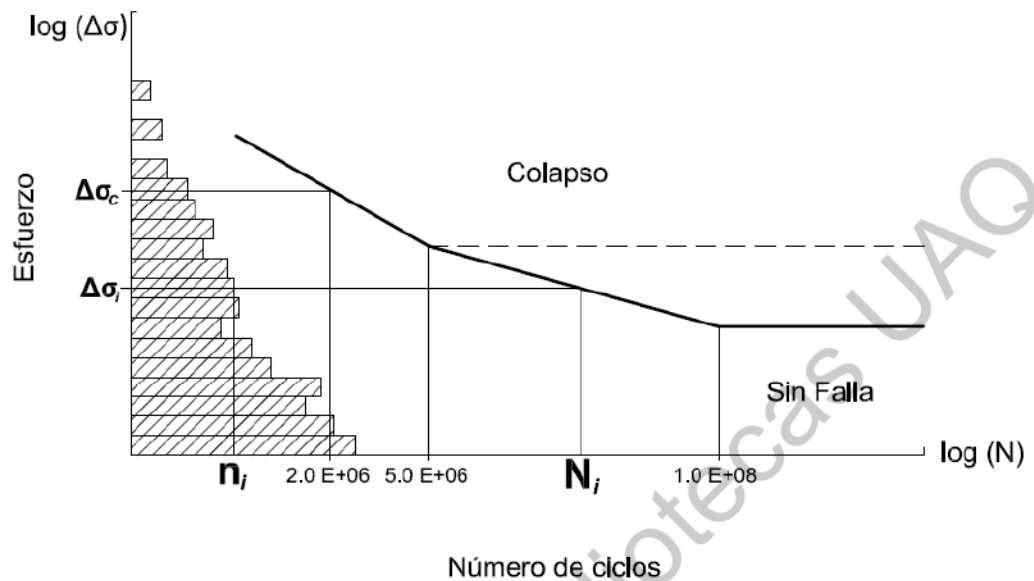


Figura 17. Parámetros de daño acumulado y nivel de seguridad

En la evaluación preliminar deben de considerarse las modificaciones que haya tenido la estructura desde su construcción, una manera de hacerlo sería evaluando cada elemento estructural utilizando la más severa condición de carga entre la estructura inicial y la estructura modificada.

- **Investigación detallada:** Al conocer los detalles críticos, y teniendo los elementos con menor nivel de seguridad, se calcula la vida remanente de la estructura. Las cargas actuantes en el puente pueden ser superiores o inferiores a las contempladas en la fase de diseño; por lo regular, los modelos estáticos son conservadores. En esta etapa, se utilizan los modelos de carga convencionales explícitos en los códigos, así como los valores de nivel de seguridad y, al actualizar la información de la fase preliminar, se calculan los primeros esfuerzos (pudiendo ser entre 10 y 40% mayores a los valores en la estructura, según el modelo utilizado para dicho cálculo). La variabilidad de las cargas puede inducir esfuerzos secundarios, debidos al impacto, vibraciones, distorsiones o deformaciones fuera del plano, ya que se trata de

fenómenos difícilmente considerados en el análisis estático y complejos a medir. En esta fase común utilizar modelos de elementos finitos para obtener el campo de esfuerzos. Así mismo, los esfuerzos obtenidos se analizan con un método de conteo de ciclos y la regla del daño acumulado de Palmgren-Miner (Figura 17). No obstante, existe incertidumbre en cuanto a la elección de la categoría de detalle, debido al factor humano presente en la construcción y manufactura de los materiales, por lo que se continúa con una investigación todavía más detallada (fase III).

- **Investigación experta:** Un equipo de trabajo experimentado en fatiga de puentes debe de tomar decisiones y proponer con base en la investigación detallada si debe profundizarse en el análisis de fatiga. Esto se lleva a cabo desde la perspectiva de la mecánica de la fractura o métodos probabilistas. A partir de la ley de Paris (descrita en apartado 3.5), la vida útil por fatiga de un detalle puede calcularse de la siguiente manera:

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C \cdot \Delta K^m} \quad (8)$$

Donde:

a_0 es la longitud inicial de la grieta,

a_c la longitud final de la misma.

Con lo anterior se asume que en el cálculo de fatiga, las cargas pueden haber iniciado desde antes la creación de pequeñas grietas. Mientras más complejo sea el campo de esfuerzos al que esté sujeto la estructura, más información requerirá el modelo para caracterizarlo. Toda vez que sea posible, debe de contarse con mediciones en campo, así como pruebas experimentales de los materiales.

Por otro lado, los métodos probabilistas se enfocan en uno de los siguientes métodos: Localización de *Hot-spots* y mecánica de la fractura. A partir de

diferentes datos de entrada según el método, es factible calcular la probabilidad de falla o el índice de confiabilidad para determinado estado límite.

- **Medidas correctivas:** Si las fases anteriores no justifican la seguridad de los elementos estructurales en servicio, se deben implementar acciones que reparen o refuercen la estructura, o bien, que se instrumente para su estudio; también pueden llevarse a cabo acciones que desalojen o reduzcan el tráfico que carga el elemento o, en el peor de los casos, llegar al reemplazo o demolición de la estructura.

3.7.3 GUOBIAO STANDARDS

Las normas estándar de China se regulan jerárquicamente, iniciando por las normas empresariales, normas locales, normas industriales hasta llegar a las más importantes: normas nacionales o *GuoBiao Standards*; las cuales están divididas en recomendaciones y obligatorias. Las últimas, identificadas por el prefijo GB, se concentran en la protección de la salud pública y seguridad.

La *GuoBiao Standards (GB) 50982-2014 Technical code for monitoring of building and bridge structures*, es el primer código en China exclusivo para el monitoreo de salud estructural, el cual cubre la mayoría de los métodos de instrumentación en campo y estipula los parámetros técnicos para el monitoreo de estructuras elevadas, de grandes claros, puentes y de base aislada (Yang, Li & Yan, 2017). Relacionadas a ellas, se encuentran la GB50917-2013, *Code for design of steel and concrete composite bridges*,

3.7.4 ASTM

La Asociación Americana de Ensayo de Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), establece algunas normas internacionales relacionadas específicamente con el análisis de fatiga. En concreto, establece las prácticas para los ensayos de fatiga y los métodos de conteo de ciclos.

La ASTM tiene un apartado para los estándares en las prácticas de fractura y fatiga, cuyo fin es comunicar los mecanismos de falla y estabilidad de los materiales. En la designación E1823 están explícitos los conceptos básicos para las pruebas de fatiga y fractura, mientras que se cuenta también con una guía y un manual para pruebas de fatiga (STP566 y STP91, respectivamente).

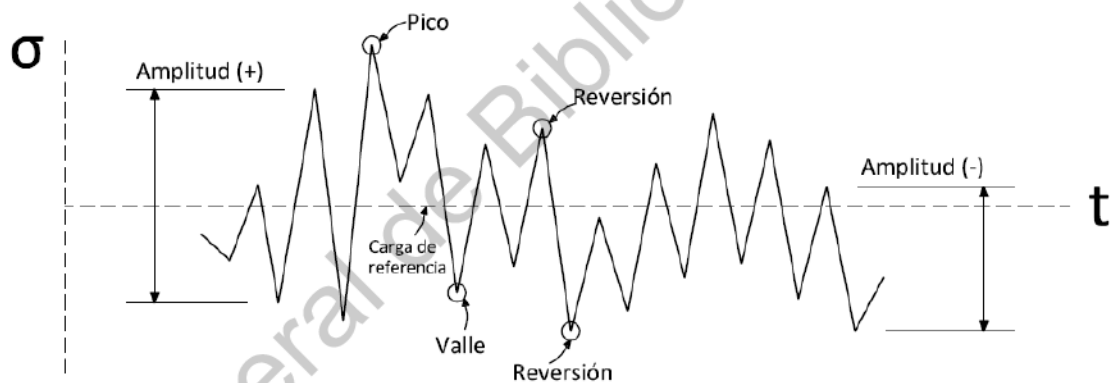


Figura 18. Parámetros en histórico de carga para fatiga

El número de ciclos relacionado al espectro del rango de esfuerzos, consecuencia del flujo individual de los vehículos se debe realizar con el método de *Rainflow*, que permitirá el cálculo del daño del vehículo por fatiga. Este y otros métodos de conteo de ciclos para el análisis de fatiga, se encuentran en la designación E1049.

4. METODOLOGÍA CLÁSICA DEL ANÁLISIS DE FATIGA

Los elementos estructurales de grandes obras metálicas están sometidos, generalmente, a esfuerzos de servicio mayormente inferiores a los esfuerzos límite del dominio elástico, fenómeno presente en los puentes de acero de gran alcance, donde las cargas de servicio no representan el estado crítico de carga y rige, más bien, el peso propio de la estructura. Sin embargo, las fallas o rupturas locales pueden aparecer en presencia de discontinuidades geométricas, como es el caso de los cordones de soldadura. Por tanto, en estos puntos de conflicto se presentan esfuerzos mayores y repetidos bajo el efecto de las cargas de servicio. Esto explica la susceptibilidad de estas conexiones a desarrollar fisuras por fatiga. En la figura 9 se muestra la secuencia que lleva el análisis clásico de fatiga para un puente, donde al conocer la geometría de la estructura es viable conocer analíticamente los esfuerzos en las secciones de interés (secciones críticas), ya sea por líneas o superficies de influencia, utilizando el método de elementos finitos o por instrumentación de un sistema de monitoreo estructural (Herrada, 2013). El efecto del paso vehicular provoca además, distribuciones de esfuerzos aleatorias en la estructura, al presentarse diferentes configuraciones en el tiempo de la posición, carga y velocidad con la que circulan las unidades. Este tipo de información es posible conocerla con sistemas de pesaje en movimiento (*Weigh-In-Motion*).

4.1 ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Las estructuras susceptibles a sufrir fatiga experimentan variaciones de esfuerzo complejos a predecir debido a la aleatoriedad de las cargas en cuanto a magnitud, posición y posibles combinaciones de ambos aspectos. El histórico de esfuerzos es resultado del irregular paso de vehículos y de la respuesta dinámica de la estructura excitada por ellos.

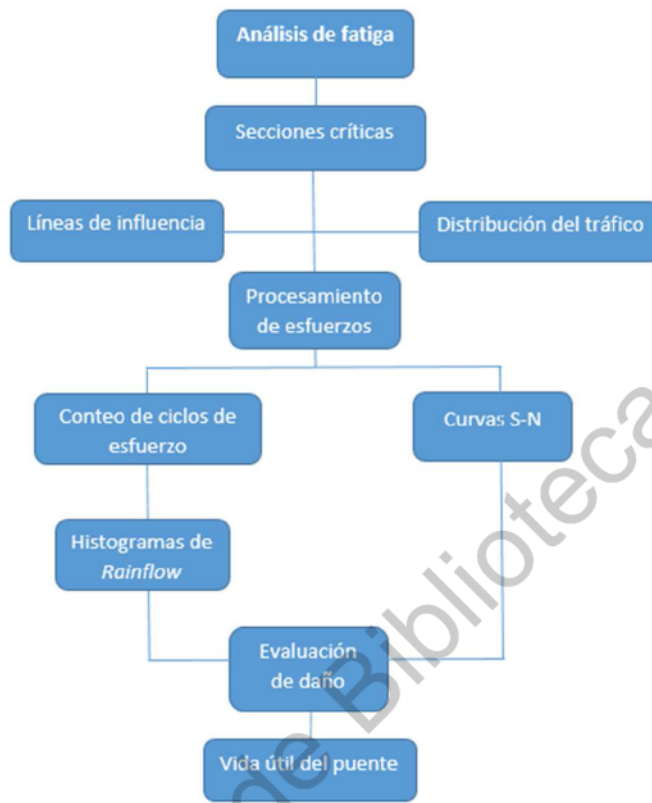


Figura 19. Metodología general del análisis de fatiga para puentes

El tradicional cálculo de efectos del tráfico vehicular se describe gracias a las líneas y/o superficies de influencia, las cuales reflejan la magnitud de los elementos mecánicos al tener diferentes combinaciones de carga (vehículos) y su posición en la estructura.

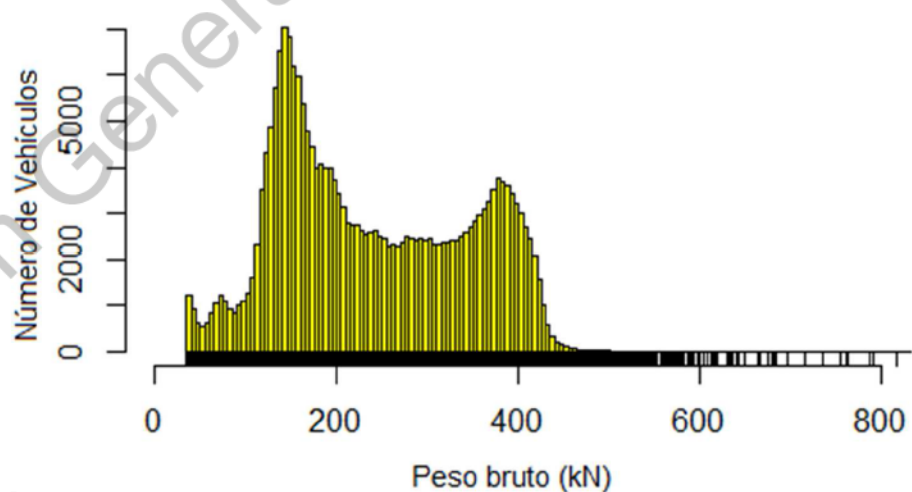
Se evalúan los esfuerzos a partir de diferentes fuentes de información: con aforos de vías de circulación, mediciones de tráfico en movimiento (sistemas *Weigh in Motion*); con simulaciones con base en distribuciones de probabilidad para un determinado período de tiempo; con modelación de estructuras por medio del método de elementos finitos; o, por mediciones en campo con sistemas de salud

estructural. Posteriormente, se realiza un estudio de la frecuencia con la que se presentan dichos esfuerzos en la estructura.

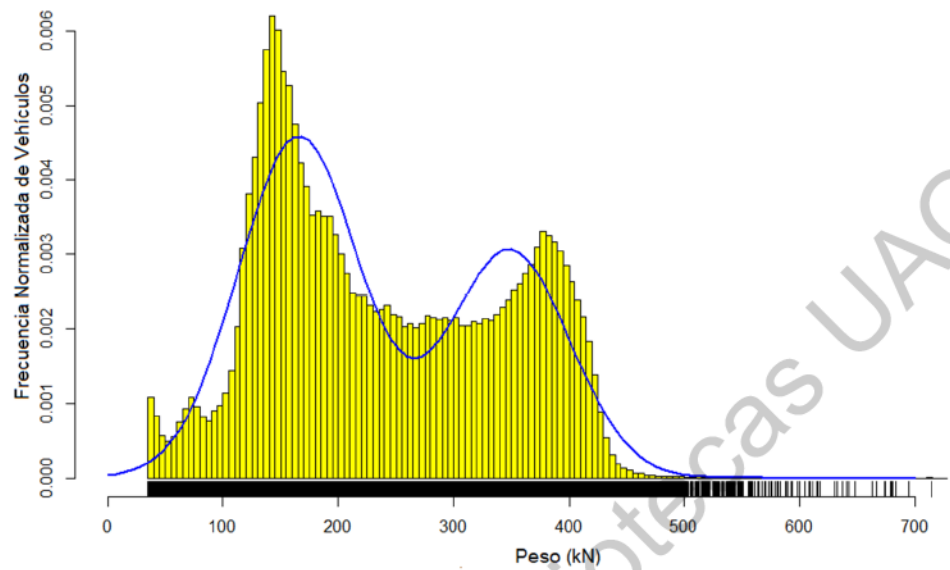


Figura 20. Calibración de sistema *Weigh in Motion*

Los esfuerzos generalmente utilizados en el análisis de fatiga se basan en el esfuerzo promedio en la sección de estudio según la teoría de mecánica estructural, los que se llaman también esfuerzos nominales y que es calculado a partir de la mecánica elástica lineal de estructuras o del método de elementos finitos (Ye *et al.*, 2014). Sin embargo, existe la posibilidad de medir en campo estos esfuerzos con el uso de galgas extensométricas que usualmente se colocan en las inmediaciones de los puntos de conflicto (comúnmente en juntas soldadas) donde existen concentraciones de esfuerzos (Capítulo 5).



a)



b)

Figura 21. Histograma de paso mensual de vehículos del puente de Normandía. a) Número de Vehículos. b) Distribución binormal de vehículos pesados

4.2 CONTEO DE CICLOS

La fatiga en puentes no es más que un problema con un número de ciclos elevado cuando existen bajos esfuerzos, cuando las deformaciones siguen siendo elásticas, a excepción de las conexiones donde existe soldadura y se producen esfuerzos concentrados en los elementos locales, traducidos en solicitaciones elevadas. Es en la vecindad de la soldadura donde se producen pequeñas deformaciones plásticas. Sin embargo, es difícil conocer el estado de esfuerzos presente en las soldaduras, ya que en ellas existen esfuerzos residuales, pero las piezas estructurales pueden instrumentarse para tal efecto.

El conteo de ciclos de esfuerzos sigue la forma de los ciclos abiertos de histéresis (semi-ciclos) de las curvas esfuerzo-deformación (σ - ϵ) (Bárcenas, 2011), y relaciona

esfuerzos que rebasan un umbral para el que si no es sobrepasado no genera daño por fatiga. El algoritmo de la gota de lluvia (*Rainflow*) es el utilizado comúnmente. Posterior a su uso, se realiza la representación de los ciclos mediante histogramas de ciclos por rangos de esfuerzo. Estos rangos de esfuerzo son intervalos de magnitud constante se contrastan con los esfuerzos de la caracterización experimental del material, comúnmente representadas por las llamadas curvas de Wöhler (o curvas esfuerzo versus número de ciclos, S-N). Los ciclos identificados se suelen representar por histogramas.

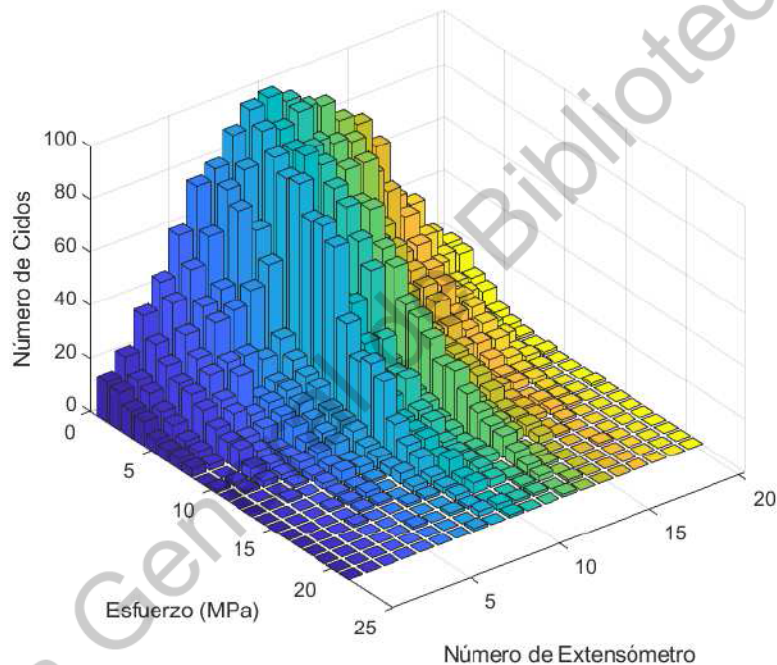


Figura 22. Histogramas de *Rainflow*

4.3 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES ANTE FATIGA

El fenómeno de fatiga obliga a tener un conocimiento del comportamiento para tener referencia de la reacción de los materiales ante la consecución de carga y descarga. Por tanto, se llevan a cabo pruebas experimentales para la

caracterización de materiales ante el fenómeno de fatiga, que resultan en curvas logarítmicas para el número de ciclos contra un esfuerzo determinado (curvas S-N).

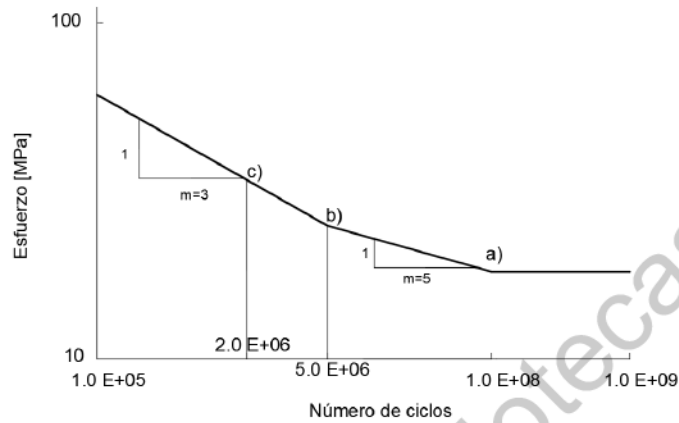


Figura 23. Curva de resistencia a la fatiga del acero de Wöhler. a) Límite de truncamiento; b) Límite de fatiga de amplitud constante; c) Resistencia a la fatiga de referencia

En la figura 23 se muestra la curva S-N para el material acero, donde se definen tres puntos: el límite de truncamiento (σ_L) es la amplitud límite de esfuerzos, por debajo de la cual se supone la vida del material por fatiga es infinita (a partir de cien millones de ciclos); el límite de fatiga (σ_D), correspondiente a una amplitud de esfuerzos a un número elevado de ciclos (cinco millones de ciclos); y la resistencia de clase o categoría de detalle del material (σ_C), amplitud de esfuerzo para un número de ciclos reducido (dos millones de ciclos), la cual también es la que se designa para nombrar los tipos de detalle del código europeo (EN-1993-1-9, anexo E), los cuales varían de 36 a 125 MPa. Para otro material, el modelo de tres pendientes varía en los límites de referencia; cabe destacar que este tipo de modelo sólo existe en algunos códigos para engranajes y soldaduras.

Para tener un valor preciso del límite de resistencia a fatiga, la expresión siguiente proporciona el límite de resistencia o límite de fatiga para el acero, esfuerzo por debajo del cual la vida del elemento por fatiga es infinita o igual a mil millones de ciclos.

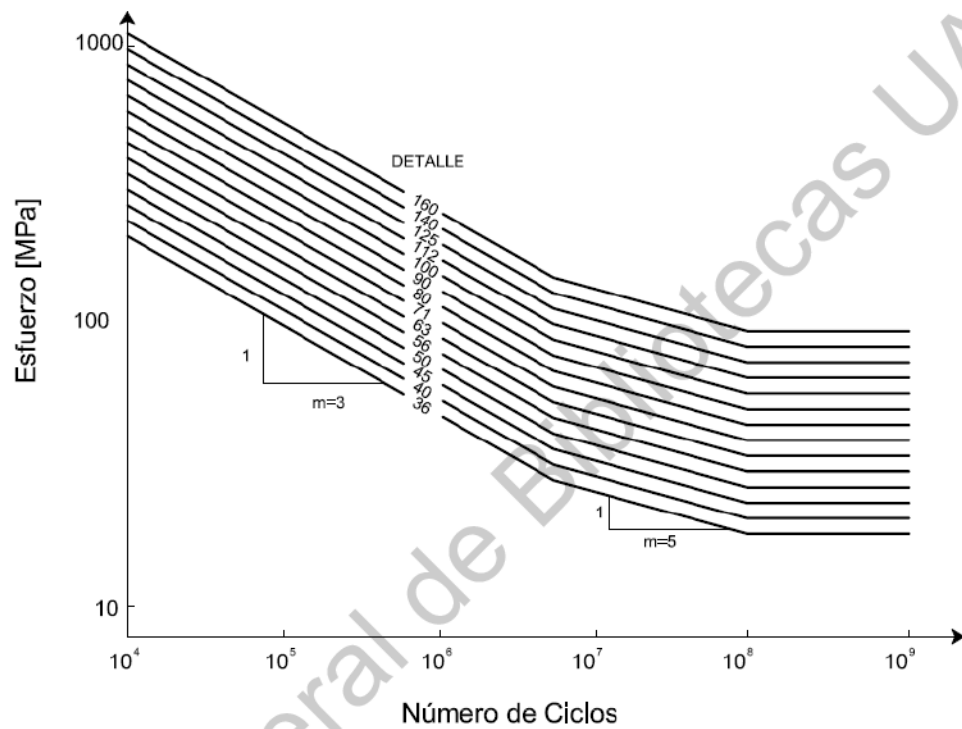


Figura 24. Curvas S-N para categoría de detalle. Fuente: *Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life*. 2008

El número de ciclos que causa un fallo en cada rango de esfuerzo $\Delta\sigma_i$ se puede calcular directamente a partir de:

$$N_i = 5 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}}{\lambda_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i} \right)^m \quad (9)$$

De donde:

$\Delta\sigma_i$ = Rango de esfuerzos para el ciclo i

$\Delta\sigma_D$ = Esfuerzo de referencia de la resistencia a fatiga a 5 millones de ciclos

γ_{Mf} = Factor parcial para la resistencia a la fatiga

λ_{FF} = Factor de daño equivalente

m = Pendiente de la curva de resistencia a la fatiga

4.4 DAÑO ACUMULADO Y VIDA ÚTIL POR FATIGA

En el cálculo de daño por fatiga y evaluación de vida útil para estructuras tipo puente, es común utilizar dos tipos de análisis: el primero radica en la utilización de las curvas de Wöhler (o curvas S-N), donde la relación entre los rangos de amplitud de esfuerzos y el número de ciclos para los cuales existe la falla del material es determinada por corridas experimentales de materiales y descrita por la curva S-N; se utiliza la regla de Palmgren-Miner para la evaluación del daño acumulado (Ye *et al.*, 2014). El segundo tratamiento para el análisis de fatiga en puentes se realiza con la perspectiva de la teoría de la mecánica de la fractura, donde se exploran las fases de inicio y de propagación de grietas en el elemento estructural y su variación con respecto al campo de esfuerzos presente en las fronteras de la grieta. Por esta razón, se ha estudiado el diseño de las conexiones soldadas para puentes de acero con base a este último principio, apoyándose en modelos de elemento finito para la discretización de los esfuerzos en los puntos de conflicto (Nagy *et al.* 2015). El uso del método del elemento finito ha sido utilizado en casos similares, como el análisis dinámico entre la interacción de la estructura con las cargas móviles que circulan por el puente, al igual que para evaluar la confiabilidad de la fatiga en puentes, utilizando simultáneamente medición de deformaciones con deformaciones obtenidas por FEM (Wang Y. *et al.*, 2010; Wu & Law, 2010).

Por ser un fenómeno de cargas de amplitud variable, es necesario un registro histórico de esfuerzos. Además, el proceso de daño por fatiga es no lineal (como lo muestra la figura 10). Para considerar el efecto del historial de esfuerzos se resume el estudio a una colección de daños para diferentes rangos de esfuerzo. La regla de

Palmgren-Miner, o sólo regla de Miner, mantiene que el daño es proporcional a la fracción de vida de los diferentes niveles de esfuerzo.

La regla de Miner sigue siendo la teoría más utilizada para el análisis de fatiga que, junto con las curvas de Wöhler, siguen sin describir fielmente la presencia de microdeformaciones plásticas a nivel de soldadura. El proceso de daño por fatiga es no lineal, a pesar de ello esta regla toma de referencia el número de ciclos a la falla de las curvas S-N, curvas logarítmicas cuyo objetivo es describir de manera lineal la no linealidad de la fatiga.

La ecuación de daño acumulado (D) de Miner (ecuación 5) requiere como información el número de ciclos a los que está sujeto un elemento estructural (n_i), así como el número de ciclos que experimentalmente, provocan el fallo del material (N_i , descrito en las curvas de Wöhler).

La vida útil por fatiga se calcula por medio de curvas S-N, obtenidas experimentalmente, así como los esfuerzos medidos en el elemento de estudio y categorizados por niveles de esfuerzos gracias al conteo de ciclos. La vida útil se expresa matemáticamente como sigue:

$$T = \frac{1}{\sum \frac{n_i}{N_i}} = \frac{1}{D} \quad (10)$$

Donde:

T = Vida útil del elemento estructural [años]

N_i = Número de ciclos de referencia para el rango de esfuerzo i

n_i = Número de ciclos aplicados para el rango de esfuerzo i

D = Daño acumulado para un año de registro

5. METODOLOGÍA DIRECTA DEL ANÁLISIS DE FATIGA

El análisis de fatiga en estructuras sometidas a cargas cíclicas es un problema mayor y, peor aún, cuando las cargas aplicadas varían aleatoriamente. Los puentes vehiculares de acero son estructuras que tienen esta problemática, por lo que el tradicional uso de las líneas y las superficies de influencia para el cálculo de los efectos mecánicos en los puentes de acero ha tenido gran importancia en la descripción de este fenómeno. Afortunadamente, se tiene una caracterización de los esfuerzos presentes en la estructura a través de sistemas de monitoreo de salud estructural.

La evaluación del daño por fatiga y la predicción de la vida útil de puentes de acero puede llevarse a cabo usando sistemas de monitoreo estructural, donde se detecta deterioro, se determinan anomalías y se cuantifica el nivel de seguridad que da lugar a proponer estrategias óptimas de mantenimiento (Dudás *et al.*, 2015). La ventaja del uso de una metodología directa radica en la inmediata obtención de esfuerzos y que comprende fenómenos ambientales que la mayoría del tiempo se omiten al pasar por cálculos analíticos, por lo que se apega a la realidad de las exigencias estructurales.

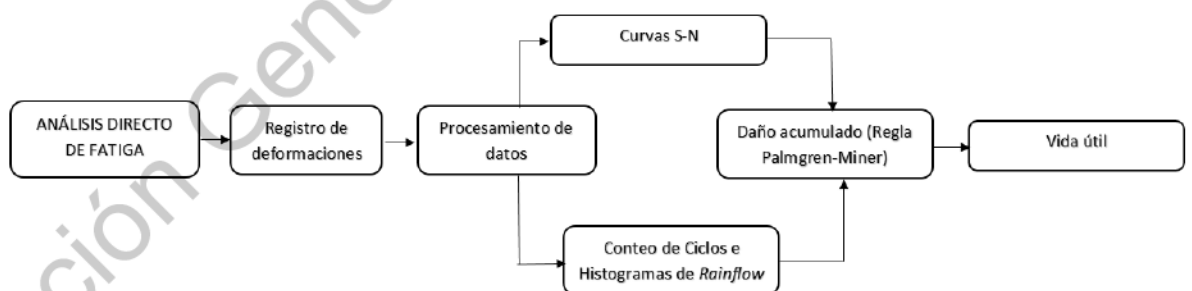


Figura 25. Metodología directa del Análisis de Fatiga

Para una aproximación rápida a la evaluación del daño y la predicción de la vida útil por fatiga en estructuras se utilizan los registros de deformaciones de galgas extensométricas, omitiendo la interacción carga-estructura. Al utilizar esta metodología no se conocen, a priori, las cargas que provocan las deformaciones registradas. Al obtener los esfuerzos por simple aplicación de la ley de Hooke (considerando un comportamiento elástico), la contabilización de los ciclos de fatiga es posible; y con ello, la evaluación del daño acumulado por la regla de Miner, información que se traduce en tiempo de vida útil para la estructura del puente de acero analizada.

Una precisa estimación de la vida remanente en los componentes críticos sujetos a fatiga es realizada con sistemas de monitoreo de salud estructural (SHMS), lo que se lleva a cabo con el continuo registro de información de la deformación dinámica a gran plazo (Ye *et al.*, 2014), por lo que un año de registro se considera significativo, aunque es importante tomar en cuenta la evolución del tráfico para predicciones futuras. Si se pretenden realizar análisis con registros de corto plazo, deben de conocerse *a priori* la distribución del tráfico según la referencia (tráfico por horas, días, semanas, meses). Por lo anterior, una perspectiva completa del tráfico redundante en un cálculo confiable y el apoyo de sistemas de pesaje en movimiento es una herramienta revulsiva para el análisis de fatiga.

5.1 REGISTRO DE DEFORMACIONES

Se ha comprobado que la deformación local medida proporciona indicios sensibles de fatiga (Wu *et al.* (2016). El uso de galgas extensométricas permite la obtención de información de las microdeformaciones presentes en una estructura, las que proporcionan indicios de los esfuerzos que realizan los elementos estructurales de los puentes de acero bajo condiciones de operación. Los datos de elongaciones se reciben como deformaciones dentro del dominio elástico del material. Esta suposición es resultado de que los puentes se sobrediseñan en

cuanto a cargas gravitacionales, y se da preferencia a que este tipo de estructuras no llegue a tener un comportamiento plástico. La medición de galgas extensométricas instaladas a la estructura deben corregirse por temperatura, al ser afectadas al dilatarse el elemento estructural y el mismo sensor, consecuencia de la evolución de la temperatura durante la medición de deformaciones. El registro bruto de la señal de deformación es mostrado en la figura 25, donde se indica una deriva creciente de las micro-deformaciones en un registro de dos horas, resultado de la dilatación del material de estudio y del material del sensor; aun así, existen leves alteraciones debidas al ruido captado por el dispositivo, pero no es representativo. Cabe mencionar que hace más de dos décadas este tipo de mediciones se hacía durante una semana aproximadamente; mientras que en tiempos actuales, se busca tener datos de todo instante, usando registros de un año, por lo general, ya que la manejabilidad de los datos y la potencia de los equipos computacionales modernos lo permiten.

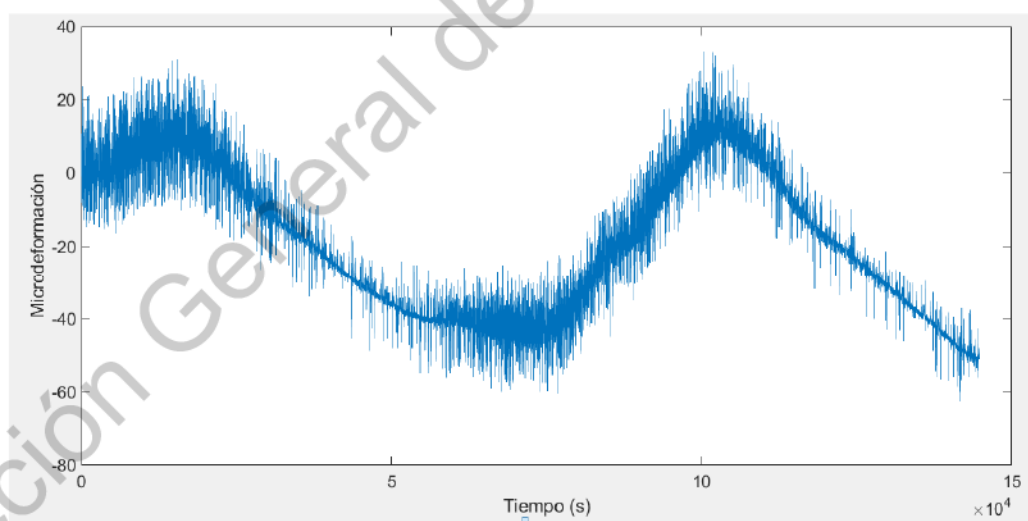


Figura 26. Registro de deformaciones brutas

El monitoreo a corto plazo en condiciones de servicio de los puentes tiene como ventaja que no requiere control de tráfico durante el registro de las señales, por lo

que la instalación y el registro de la respuesta como tal, se hacen de manera rápida, por lo que dan un primer criterio al comportamiento general de la estructura. Empero, el registro de deformaciones a través de galgas extensométricas tiene como limitante el desconocimiento de las cargas que provocan las deformaciones; en específico, la configuración del vehículo y la carga contenida.

5.2 SÍNTESIS DE ESFUERZOS MÁXIMOS PRESENTADOS

El registro de las deformaciones es convertido a registro de esfuerzos por aplicación de la ley de Hooke. A partir de aquí, el objetivo es disminuir la enorme cantidad de datos para conservar únicamente los puntos de interés. Por tanto, el primer paso es guardar las reversiones, es decir, los picos y valles.

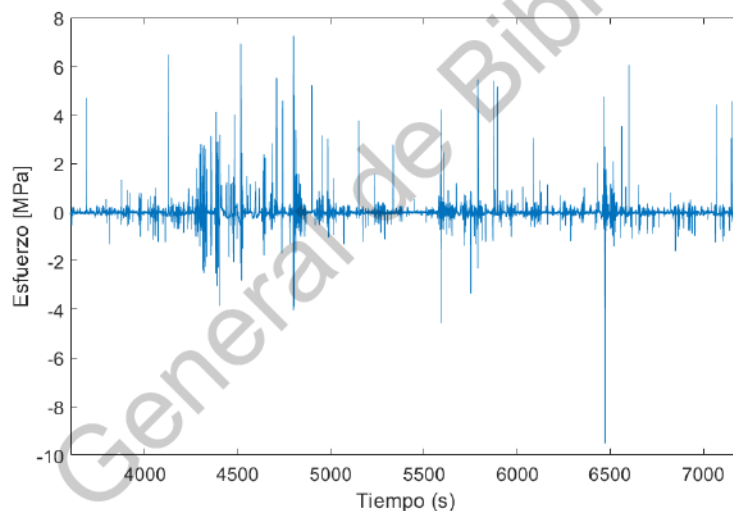


Figura 27. Histórico de esfuerzos en una hora

Después de tener la colección de reversiones, existen métodos para simplificar aún más la cantidad de información. Para ello se propone un umbral que tome en cuenta la amplitud entre dos puntos y que el algoritmo conserve la información por encima de ese umbral. Posterior a ello, se resume la información de manera gráfica para el posterior conteo de ciclos.

5.2.1 PICOS Y VALLES

La reducción de los registros de extensómetros en picos y valles radica en la detección de las reversiones, o cambios de signo, de la señal. Los datos de las reversiones son guardados y los datos entre estos puntos son descartados ya que no tienen utilidad alguna en el análisis de fatiga. Junto con los puntos que se conservan se localiza el dato de tiempo correspondiente para obtener un histórico de deformación-tiempo con el mismo número de datos.

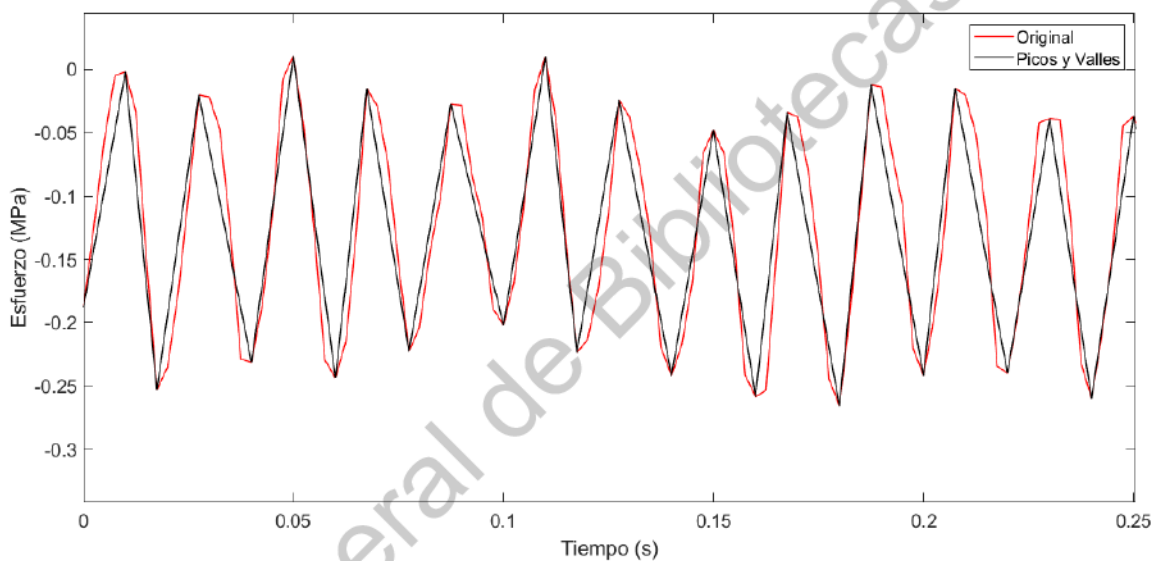


Figura 28. Reducción de registro a picos y valles

5.2.2 REDUCCIÓN DE DATOS CON UMBRAL

En muchos casos, el diez por ciento de todas las amplitudes de esfuerzo registradas, es la que produce el noventa por ciento de daño en la estructura. Estas amplitudes representan a los datos de mayor magnitud de esfuerzos ya que son los valores que sobrepasan el límite de truncamiento para el que se obtienen daños por fatiga. Por tanto, es práctico no tomar en cuenta los ciclos de esfuerzo menores al cinco por ciento del límite de truncamiento, que muchas veces provienen del mismo ruido de los sensores. Este proceso debe de hacerse previo al conteo de ciclos:

existen diferentes técnicas teniendo un umbral para el desecho de la información no conveniente.

5.3 ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE ESFUERZOS

Para el análisis de señales se presentan dos dificultades: la definición de los rangos de esfuerzos para no subestimar o sobrestimar valores que pudieran quedar fuera del rango; y la definición específica de los ciclos a los que se somete la estructura, la cual se define por medio del método de *Rainflow*, abordado en sección 4.2.

Deben evaluarse, primeramente, el contenido de los archivos en cuanto el técnico los proporciona; cabe señalar que pueden existir errores en las medidas, saturación de mediciones iniciales o finales. Habrá que decidir si dichos errores perjudican notablemente el estudio; de ser así, se evalúa si es posible prescindir de esas mediciones. También es común realizar ajustes en cuanto al orden en la numeración de sensores, por lo que hay que tener presente la correspondencia entre el orden llevado por el proveedor y el usuario de los datos.

Debe recordarse que las galgas extensométricas trabajan con un coeficiente de galga k que relaciona la proporcionalidad de la variación de la resistencia eléctrica y su deformación. Tomando en cuenta la ley de Hooke, se transforman las deformaciones longitudinales a esfuerzos, mismos que están presentes en la estructura a la que el aparato está pegado. Los efectos parásitos, como lo son la temperatura (dilatación de los materiales y variación en la resistencia del sensor), errores de linealidad del sensor e histéresis, dependen también de la exposición del instrumento a agentes externos, del proceso de colocación, del tipo de arreglo utilizado (cuarto de puente, puente completo, etcétera), y la posición del sensor para medir el tipo de sollicitación requerida (presión, flexión, torsión, temperatura).

Basta con una prueba de calibración para darse cuenta de un comportamiento inicial de la estructura, donde se presentan alargamientos de los sensores más próximos al vehículo de prueba y, por lo general, algunos acortamientos en los sensores opuestos al lado de circulación del vehículo.

5.3.1 CORRECCIÓN DE DERIVA POR TEMPERATURA

Los cuerpos que sufren dilatación debido al incremento de temperatura producen deformaciones libres, es decir, sin esfuerzos. Si se trata de un material isótropo y homogéneo, la deformación lineal debido a la variación de temperatura del cuerpo se expresa como sigue:

$$\varepsilon_{Temp}(x, y, z) = \alpha \cdot \Delta T \quad (11)$$

donde α es el coeficiente de expansión térmica del espécimen y ΔT el cambio de temperatura. Para el acero estructural, se considera que tiene un coeficiente de expansión térmica de $11.7 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$. El aumento volumétrico con ausencia de carga da lugar a la llamada deformación aparente (ε_{App}), que al medirse con sensores, extensómetros por ejemplo, debe de considerarse la diferencia entre deformaciones según los materiales del sensor y el espécimen para tener una deformación fiable.

$$\varepsilon_{App} = \varepsilon_{Temp} + \Delta\varepsilon_{Galga} \quad (12)$$

Las lecturas de galgas extensométricas varían al haber un cambio en la temperatura en el sistema de monitoreo o en la estructura estudiada (Cullington & Hoar, 1975). Según el tipo de galga utilizada en el proyecto, es necesario hacer una

compensación por temperatura, ya que la dilatación del instrumento provoca una deriva en las mediciones, aunque existen galgas autocompensadas y arreglos de diferentes galgas para reducir este efecto. Al usar simples galgas extensométricas y registrar simultáneamente la temperatura (figura 30), computacionalmente es factible modificar el registro de deformaciones y obtener la deformación de los elementos estructurales sin la influencia del efecto térmico.

Las galgas autocompensadas tienen como principal característica la nulidad del efecto térmico entre materiales debido al mismo coeficiente de dilatación entre el sensor y el espécimen; sin embargo, persiste un error residual de la componente no lineal, por consecuencia, no es viable eliminar en su totalidad la deformación térmica con este tipo de extensómetro. Los fabricantes de estos dispositivos proporcionan una ficha característica para cada lote de galgas, donde un polinomio, por lo general mínimo de cuarto grado, describe el cambio de deformación aparente con la temperatura (figura 29).

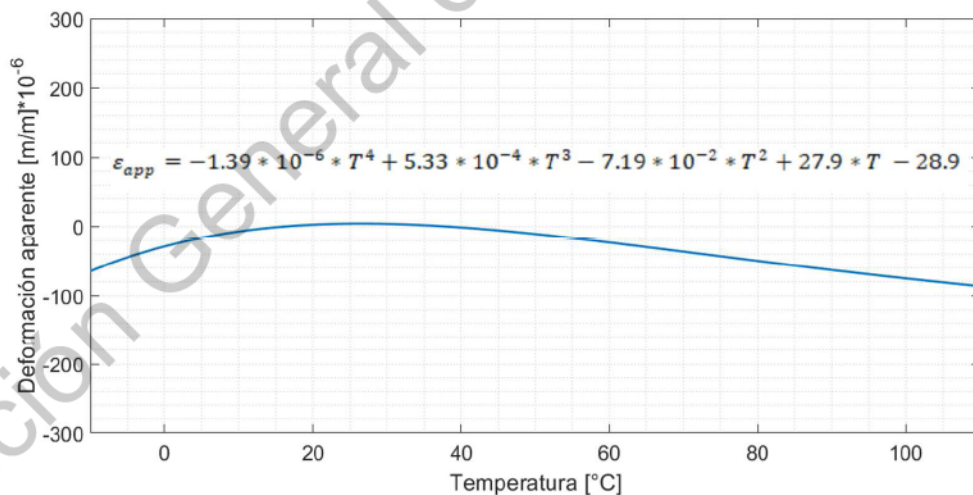


Figura 29. Deformación aparente en polinomios según temperatura

Como se discutió en la sección 3.4.1, existen configuraciones de circuito que contribuyen a disminuir las alteraciones en la señal.

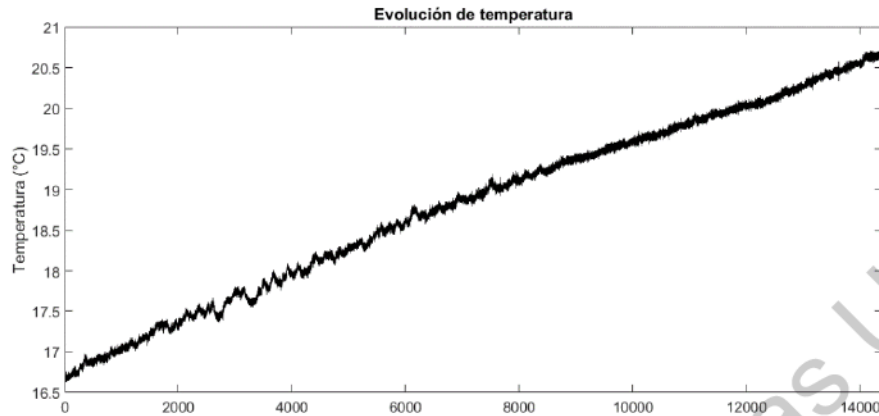


Figura 30. Comportamiento de la temperatura durante un registro de deformaciones de cuatro horas.

$$\varepsilon_{Real} = \varepsilon_{Medida} - \alpha \cdot \Delta T = \varepsilon_{Medida} - \varepsilon_{Temp}$$

$$\varepsilon_{Real} = \varepsilon_{Medida} - \varepsilon_{App} \quad (13)$$

Donde ε_{Real} se debe a la carga aplicada o desplazamientos de la estructura.

Al utilizar el coeficiente de expansión térmica y polinomios o curvas del efecto térmico del dispositivo de medición proveídos por el fabricante (anexo C), así como el coeficiente de expansión del elemento objeto de instrumentación, se compensa el efecto de la temperatura en el registro, así como se elimina la deformación aparente que capta el dispositivo.

Otro método para la corrección de la deriva por temperatura es suponiendo un comportamiento lineal de la temperatura por ventanas en el periodo de registro, por lo que se corrigen las mediciones con métodos de pendiente o mínimos cuadrados.

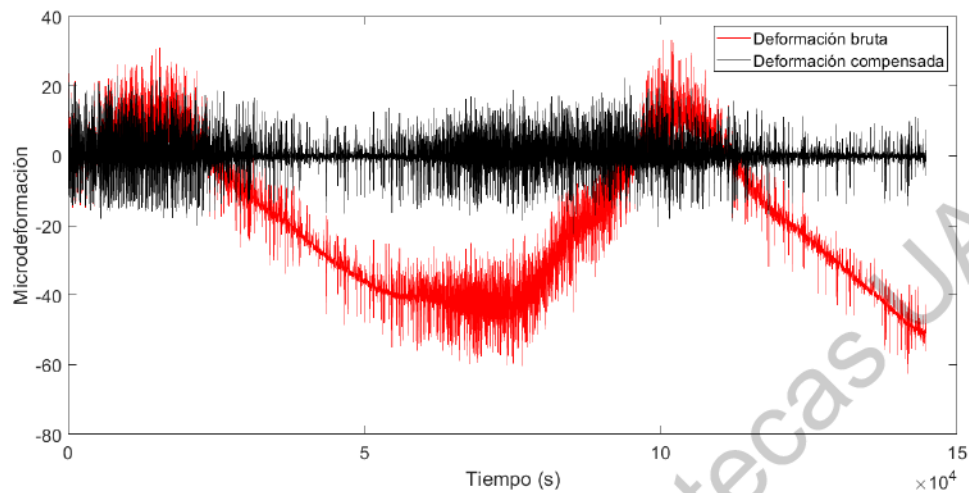


Figura 31. Corrección de deriva por temperatura por mínimos cuadrados

5.4 COMPORTAMIENTO A LA FATIGA

Los elementos estructurales de grandes obras metálicas están sometidas, generalmente, a esfuerzos de servicio mayormente inferiores a los esfuerzos límite del dominio elástico. Sin embargo, las fallas o rupturas locales pueden aparecer en presencia de discontinuidades geométricas como en el caso de los cordones de soldadura. Entonces, en estos puntos de conflicto se presentan esfuerzos mayores y repetidos bajo el efecto de las cargas de desarrollo.

Las galgas extensométricas deben colocarse lo más cercanas a los puntos de conflicto para conocer los esfuerzos de mayor magnitud, pero lo suficientemente distantes del cordón de soldadura que, con esfuerzos remanentes, altera las mediciones. Se recomiendan 25mm a partir del cordón de soldadura y si se colocan unidireccionalmente en un cuarto de puente, deben de corregirse ruido y temperatura de la señal.

La fatiga en puentes no es más que un problema con un número de ciclos elevado cuando existen bajos esfuerzos, cuando las deformaciones siguen siendo elásticas,

a excepción de las conexiones donde existe soldadura y se producen esfuerzos concentrados en los elementos locales, traducidos en sollicitaciones elevadas. Es en la vecindad de la soldadura donde se producen pequeñas deformaciones plásticas.

A partir de la obtención de un histórico de esfuerzos simplificado, recabado de los registros brutos de deformaciones, la metodología clásica es adaptable para los pasos siguientes (conteo de ciclos, curvas S-N y regla de Miner).

6. SISTEMATIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE FATIGA

El algoritmo para el análisis de fatiga en puentes de acero de grandes claros con registros de extensómetro se adjunta al software creado por Bárcenas (2011) y modificado por Herrada (2013), Medina (2014), Moreno (2016a), Moreno (2016b) y Álvarez (2017).

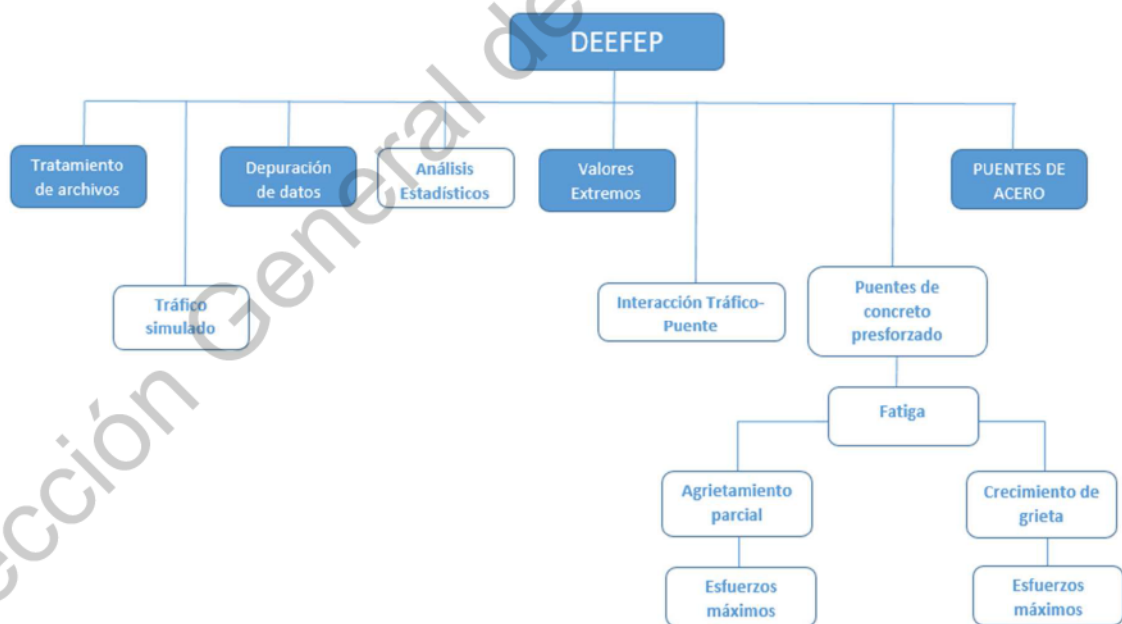


Figura 32. Estado actual del software DEEFEP (Álvarez, 2017)

Se compila el proceso entero, en lenguaje C, a través de la plataforma *Visual Studio* 2017. Se da un formato claro para el usuario del DEEFEP, sin ambigüedades, para que cualquier usuario tenga certeza de los resultados que produce el software, aún si no tiene conocimientos profundos del comportamiento de puentes.

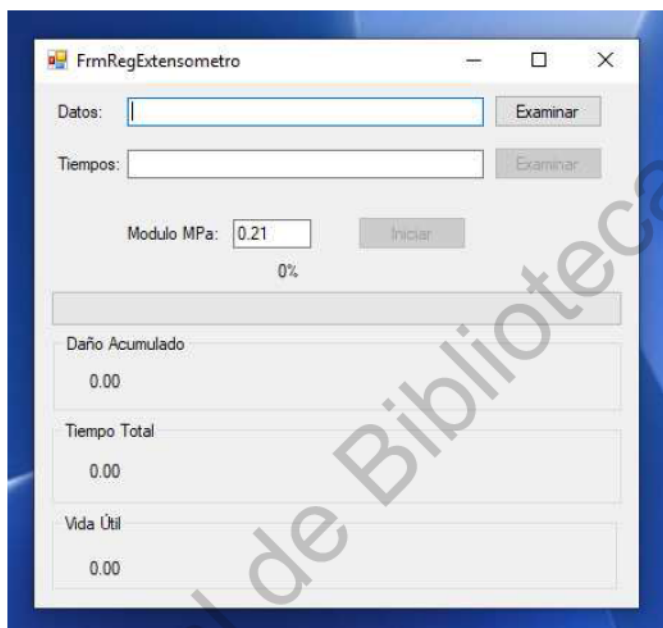


Figura 33. Registros de Extensómetro en software DEEFEP

Para el tratamiento de los archivos se demanda al usuario ingrese las direcciones de los archivos de deformaciones brutas, así como del tiempo correspondiente (se deben proporcionar en una sola columna consecutivamente, sin comas ni espacios). Luego, es posible proporcionar un módulo de elasticidad para el material de estudio en mega pascales; el programa, proporciona por *default* el módulo de elasticidad del acero. Lo mismo ocurre con la categoría de detalle, donde el detalle 50 es el preestablecido. Después el algoritmo compila los ciclos que pueden ser consultados al seguir el enlace respectivo, y como resultados finales muestra el daño acumulado, el tiempo total de medición y la vida útil del elemento. Cabe mencionar que existe un factor de tiempo modificable a considerar para la vida útil, según el tiempo de

medición y otras consideraciones que pudieran hacerse como la ocurrencia de ese tipo de registro según la estación del año, los días o las horas.

7. CASO DE APLICACIÓN: PUENTE DE NORMANDÍA

El puente atirantado de Normandía terminó de construirse en 1995, está formado por estructura metálica, multicables y concreto pretensado, con un sistema estructural sensible a la fatiga: la losa ortótropa, que consiste en un tablero metálico formado por una sección cajón, rigidizada por diafragmas, que trabaja de manera anisótropa en los diferentes ejes y que es soportado por un sistema de artesas metálicas trapezoidales generalmente (figuras 34 y 35). Su exposición a la fatiga se debe a la gran deformabilidad de la estructura al pasar vehículos pesados por ella (De Freitas, 2012). Por otro lado, este tipo de sistema estructural tiene un alto grado de hiperestaticidad y una gran capacidad de redistribución de cargas. La resistencia de las cubiertas ortótropas está directamente relacionado con el nivel de la soldadura, donde la penetración es un aspecto fundamental para que los elementos no se fisuren.



Figura 34. Fotografía de Puente de Normandía. Cortesía Dr. Moisés Arroyo Contreras

Tiene una longitud de 2141 metros y un claro principal de 856 metros. La placa metálica portante tiene espesor variable (12mm – 14mm); los pilares que sujetan los tirantes elaborados de concreto reforzado, tienen forma de “y” invertida y miden más de 200 metros de altura.



Figura 35. Colocación de último tramo de losa ortótropa

7.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las estructuras constituidas por losas ortótropas constituyen de las soluciones más pertinentes en la construcción de puentes, sobre todo si de conseguir grandes claros se trata. Este hecho sugiere una optimización de los materiales y por el poco peso propio de la estructura una gran deformabilidad está presente. Las fisuras de los elementos en losas ortótropas se encuentran en la soldadura entre la placa y los refuerzos trapezoidales (figuras 36, 37), causadas por las grandes deformaciones debido al paso del tráfico pesado y la insuficiente rigidez local en las conexiones placa-artesas. Por tanto es en esta zona, en la unión de elementos longitudinales y placa de soporte, donde las amplitudes de esfuerzos son mayores, de ahí queda

explícita la relación entre la resistencia a fatiga de la estructura y la calidad de soldadura.



Figura 36. Sección transversal del puente Normandía

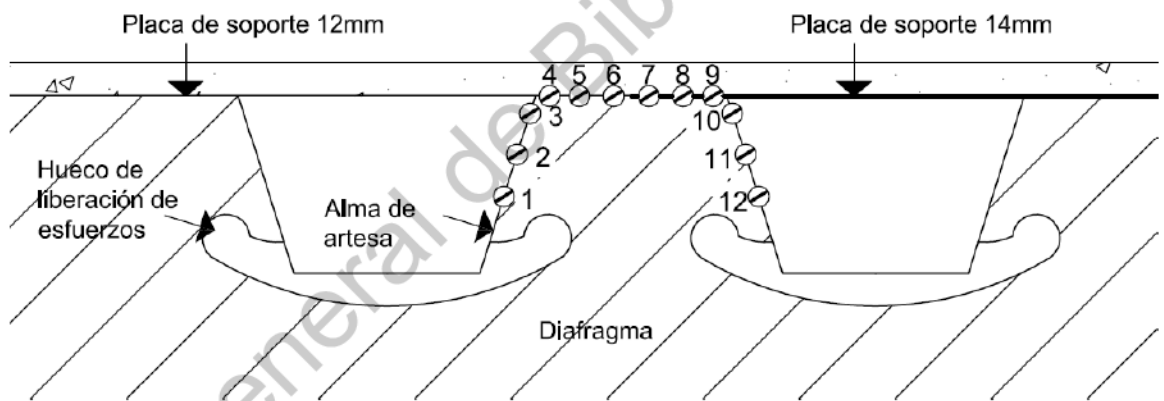


Figura 37. Posición de galgas extensométricas

Además, en el puente de Normandía se efectuaron modificaciones a los carriles de flujo del puente, donde se ajustaron las vías de alta y baja velocidad para dar espacio a una ciclovía de (figura 38).



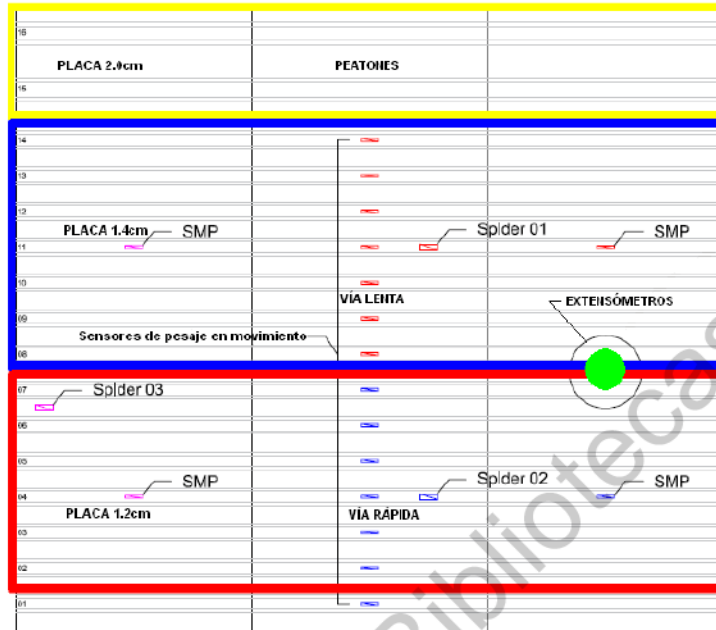
Figura 38. Ciclovía no contemplada en proyecto inicial

Las modificaciones de la posición y desfase de los carriles vehiculares provocan que el tráfico pesado circule por la placa de 12mm, situación no anticipada y que genera esfuerzos mayores en el ensamble tablero-artesas (figura 39). Ya que dicho ensamble funciona como un apoyo sometido a una rotación al momento de transferirse los esfuerzos, se pueden presentar amplitudes de esfuerzos que castiguen a la estructura por el efecto de fatiga.

Como instrumentación se utilizan 12 galgas extensométricas, sin compensación de temperatura (configuración de un cuarto de puente). A la par, se tiene una sonda de temperatura para tener la evolución de la temperatura durante el período en el que transcurre el registro de cuatro horas. Esta información se omitió para el registro de 40 horas.

Se colocan los instrumentos de manera geométrica, teniendo seis unidades en el alma de la artesa (tres galgas por el lado izquierdo y tres galgas por el lado derecho; mientras que en la parte inferior de la placa portante se colocan las seis faltantes (figura 37, anexo D).

a)



b)

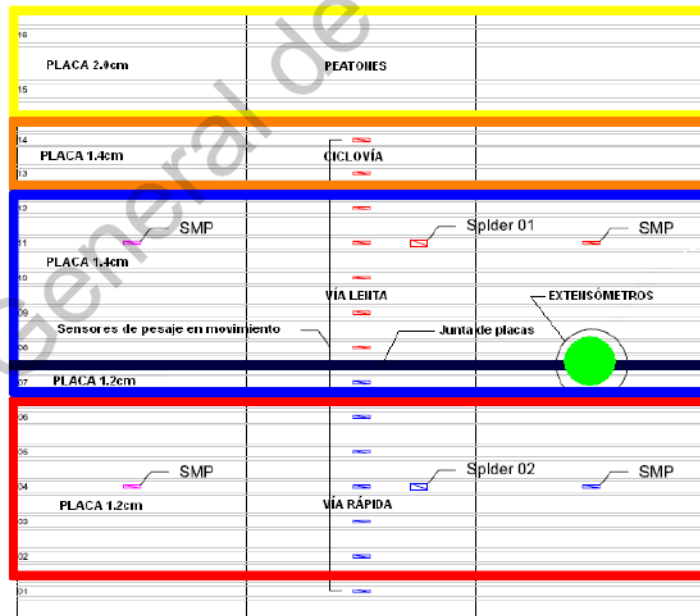


Figura 39. Carriles de circulación del puente de Normandía. a) Original b) Inclusión de cicloavía

La posición transversal de las galgas extensométricas se realiza con intención de analizar los cambios a nivel de esfuerzos en la junta entre las placas de soporte de 12mm y 14mm, ya que las líneas de tráfico se recorrieron al incluir en el proyecto una vía para bicicletas. La posición longitudinal se elige a medio claro entre diafragmas, con el conocimiento previo de la mayor influencia de la carga (por líneas de influencia).

7.2 MODELO ELEMENTO FINITO

En la complejidad del campo de esfuerzos de una losa ortótropa en puentes vehiculares se encuentran inmersos tres fenómenos diferentes combinados (De Backer *et al.*, 2007). Las acciones en este sistema estructural resultan entonces, de los esfuerzos de membrana producidos por la flexión de las vigas laterales, junto con la placa que aporta rigidez como patín superior a las artesas; la anisotropía ortogonal de la cubierta distribuyendo la carga de servicio en las rigideces de las artesas y los diafragmas; y la flexión longitudinal o transversal de los elementos placa bajo la carga de los neumáticos.

Para mayor representación geométrica se modelan cinco cubiertas de puente, de 3.93m de longitud cada una, lo que permite también modelar las condiciones de apoyo en las fronteras definidas por los cuatro tensores correspondientes, ya que en los extremos están situados los tensores donde se hacen las suposiciones de las condiciones de soporte. La figura 40 muestra la configuración de las cinco cubiertas divididas por diafragmas y se representan los tensores por idealización visual (en el modelo sólo son caracterizadas las condiciones de soporte). Al estar alejada de las fronteras, la sección de estudio sufre menores disturbios en los cálculos de los esfuerzos según el principio de Saint-Venant.

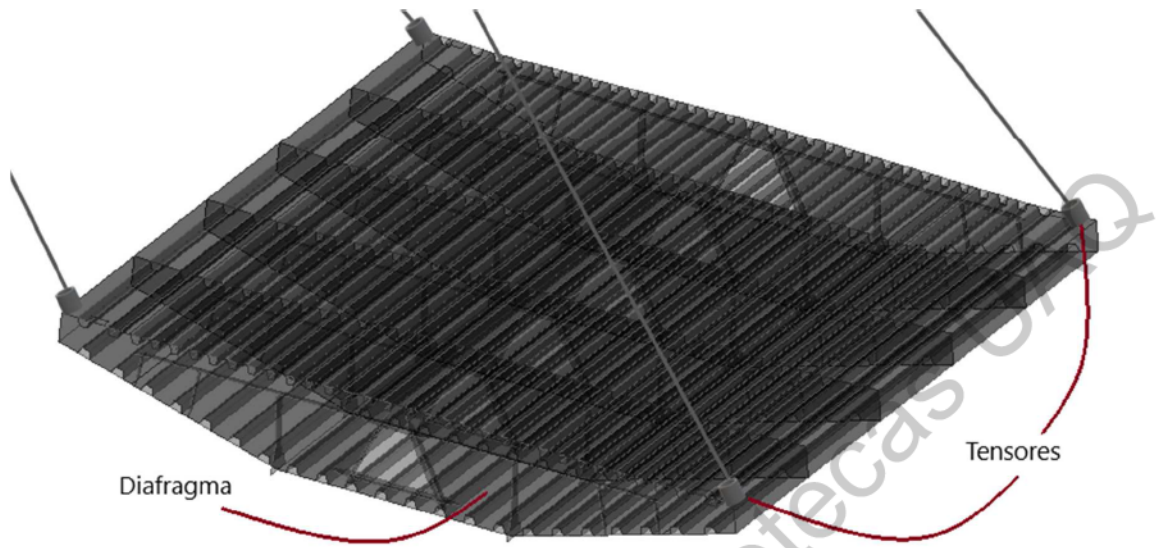


Figura 40. Representación de cubiertas y tensores de puente de Normandía

La capa de asfalto no es modelada, pero su peso y el efecto en la aplicación de la carga sí, al aumentar el área de contacto, tomando un ángulo de 45° y un espesor de capa de 7cm (Xiao *et al.*, 2008).

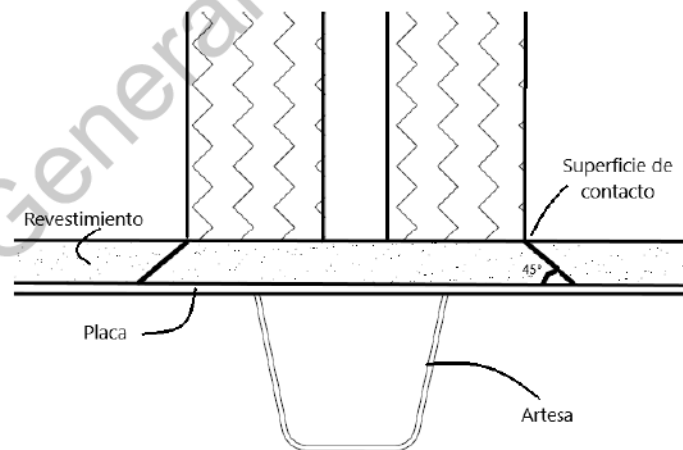


Figura 41. Difusión de carga a través de revestimiento.

El modelo de elemento finito se realiza con elementos *shell* siguiendo la teoría de la cinemática de Love-Kirchhoff. En la modelización de losas ortótropas se realizan las simplificaciones siguientes según de Freitas (2012):

- El esfuerzo normal perpendicular a la superficie neutra es despreciable
- El espesor de los elementos debe ser relativamente pequeño respecto a las otras dimensiones y la carga se aplica perpendicularmente a la superficie de la cubierta.
- Las secciones planas perpendiculares a la superficie neutra antes de la deformación permaneces planas al plano después de ella (hipótesis de Love-Kirchhoff).
- Los desplazamientos en las direcciones x y z son consideradas mucho menores que en la dirección y .

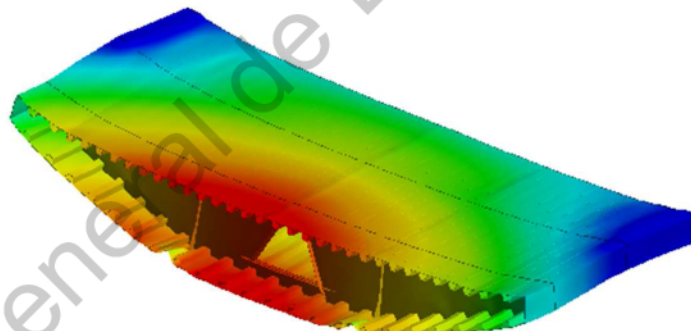


Figura 42. Sección de puente deformada por peso propio

Gracias al método de elementos finitos, es posible obtener los esfuerzos que provocan las cargas establecidas en el código europeo (EN-1991-2) y representar las líneas y superficies de influencia a partir de los modelos de carga por fatiga (anexo B). Además, con las mediciones de *Weigh in Motion* para el puente de Normandía, se conoce la distribución del tráfico pesado según el tipo de vehículo.

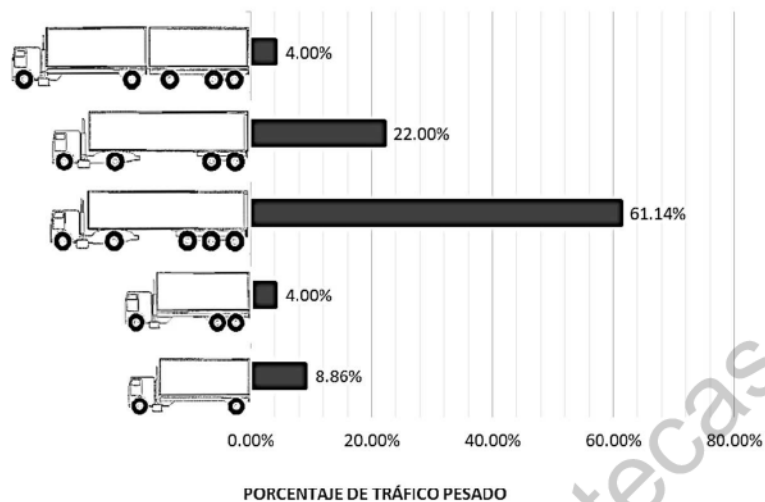


Figura 43. Distribución del tráfico pesado en el puente de Normandía

7.3 ANÁLISIS DIRECTO DE FATIGA

Se realizó el análisis de fatiga para dos casos, debido a los diferentes registros proporcionados por el *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR). Para el primer caso, el tiempo de registro es de 4.298 horas, medidos del 18 de octubre del 2017 desde las 13:20 hasta las 17:37, con una frecuencia de muestreo de 600 Hz. Para el segundo caso, el tiempo de registro corresponde a 40.801 horas, medidos del 25 de enero a las 12:34 al 27 de enero del 2018 a las 4:50, con una frecuencia de muestreo de 400 Hz. La galga número 9 falló por lo que se omite en el análisis. La unidad de medición de los extensómetros es en microdeformación [$\mu m/m$]. La medición de temperatura se realizó solamente para el primer registro [$^{\circ}C$], por lo que se realizó un análisis de fatiga compensando la temperatura con mediciones de temperatura junto al coeficiente de expansión térmica de la galga que se ajusta al del acero estructural (autocompensación) con un valor de $\alpha = 11.8 * 10^{-6}/^{\circ}$ (véase anexo C) y otro análisis con el método de mínimos cuadrados (RMS).

7.4 OBSERVACIONES Y RESULTADOS DEL PUENTE DE NORMANDÍA

El análisis de fatiga utilizando la metodología directa se aplicó para el puente de acero de Normandía, con la ayuda de galgas extensométricas. El inicio del análisis se efectuó con la obtención rápida de deformaciones que, con la ley de Hooke, fueron transformadas a esfuerzos. La deriva del histórico de esfuerzos por temperatura se corrigió y presentó en una secuencia de picos y valles para procesar menor información al llegar al conteo de ciclos.

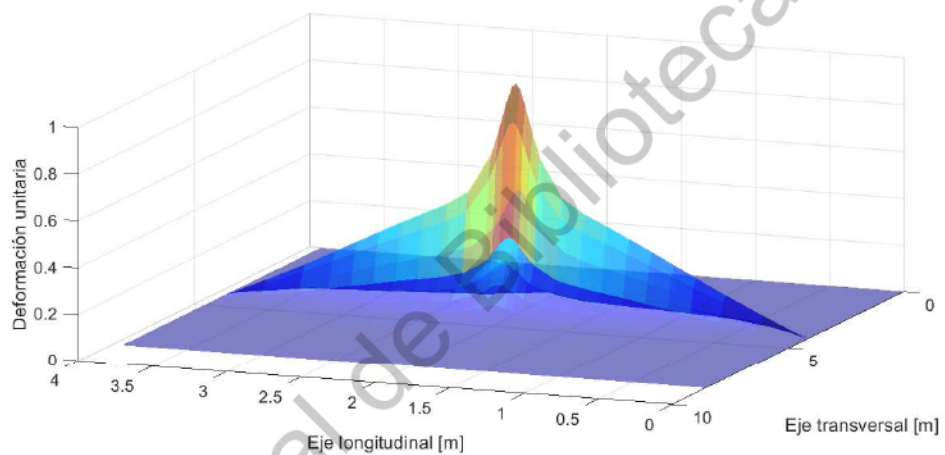


Figura 44. Superficie de influencia en la placa a centro entre artesas

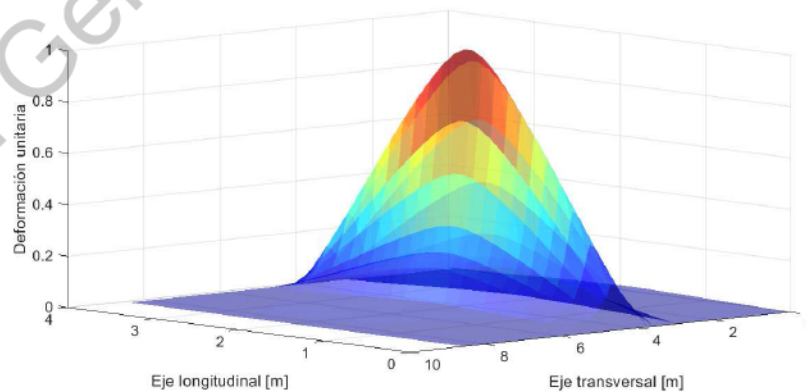


Figura 45. Superficie de influencia en la junta placa-artesa.

Las superficies de influencia denotan la importancia de la posición de la carga en el eje transversal, mientras que al longitudinal se comporta como una viga simplemente apoyada. Este fenómeno se muestra mejor en la figura 46.

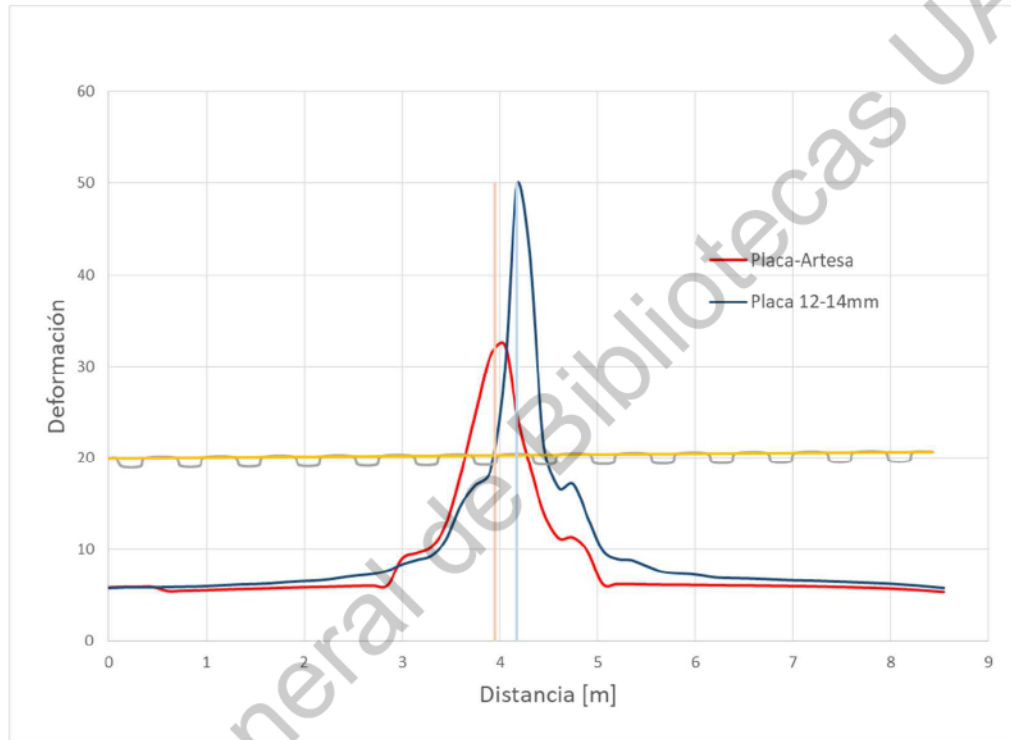


Figura 46. Líneas de influencia transversales

La colección de número de ciclos para cada galga se computó para los casos de cuatro y cuarenta horas (figuras 47 y 48). Los ciclos de interés son los que son para una categoría de esfuerzo mayor a la del umbral del límite de truncamiento, por lo que no todas las galgas son representativas de daño por fatiga.

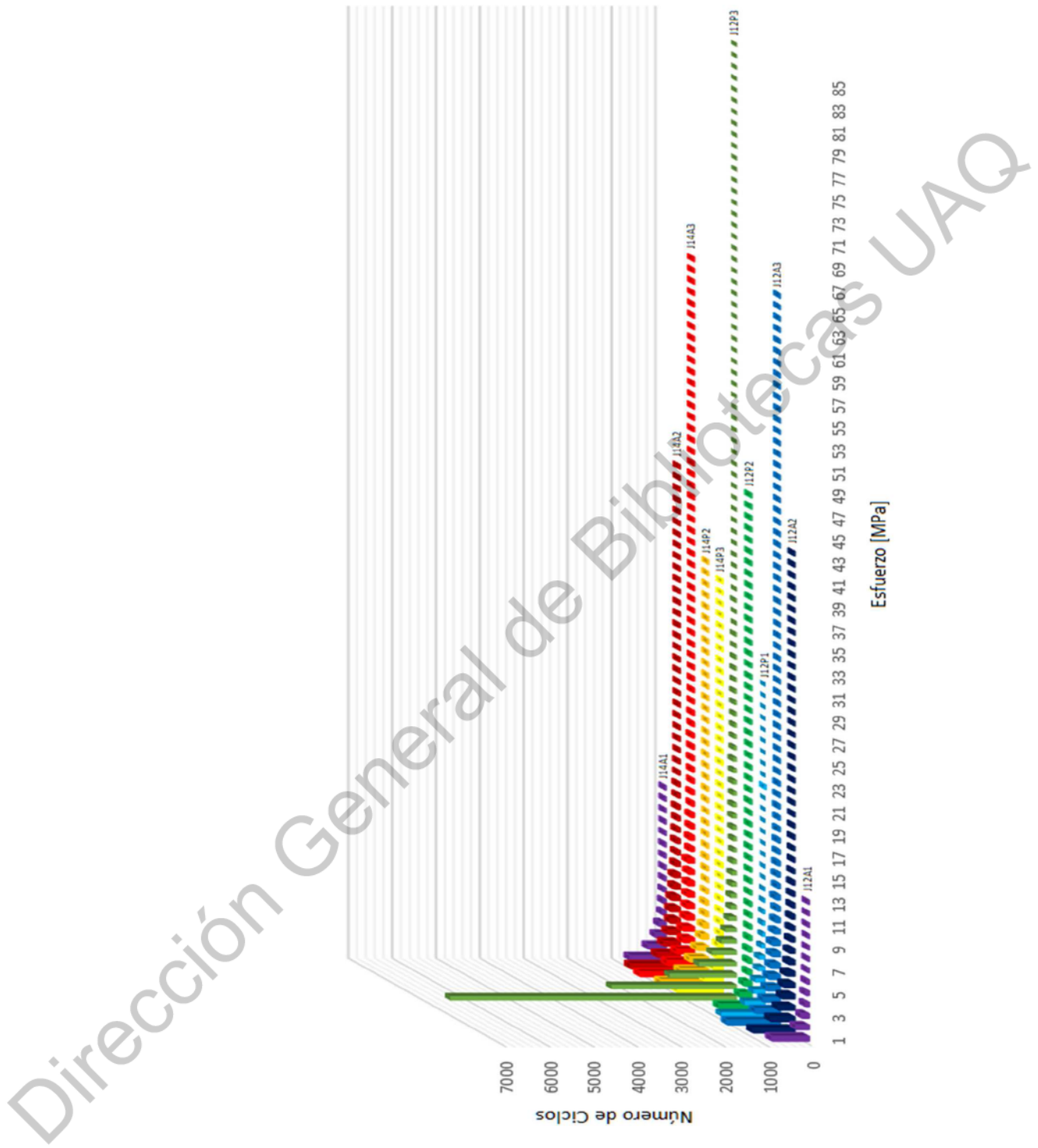


Figura 47. Histogramas de *Rainflow* para registro de 4 horas

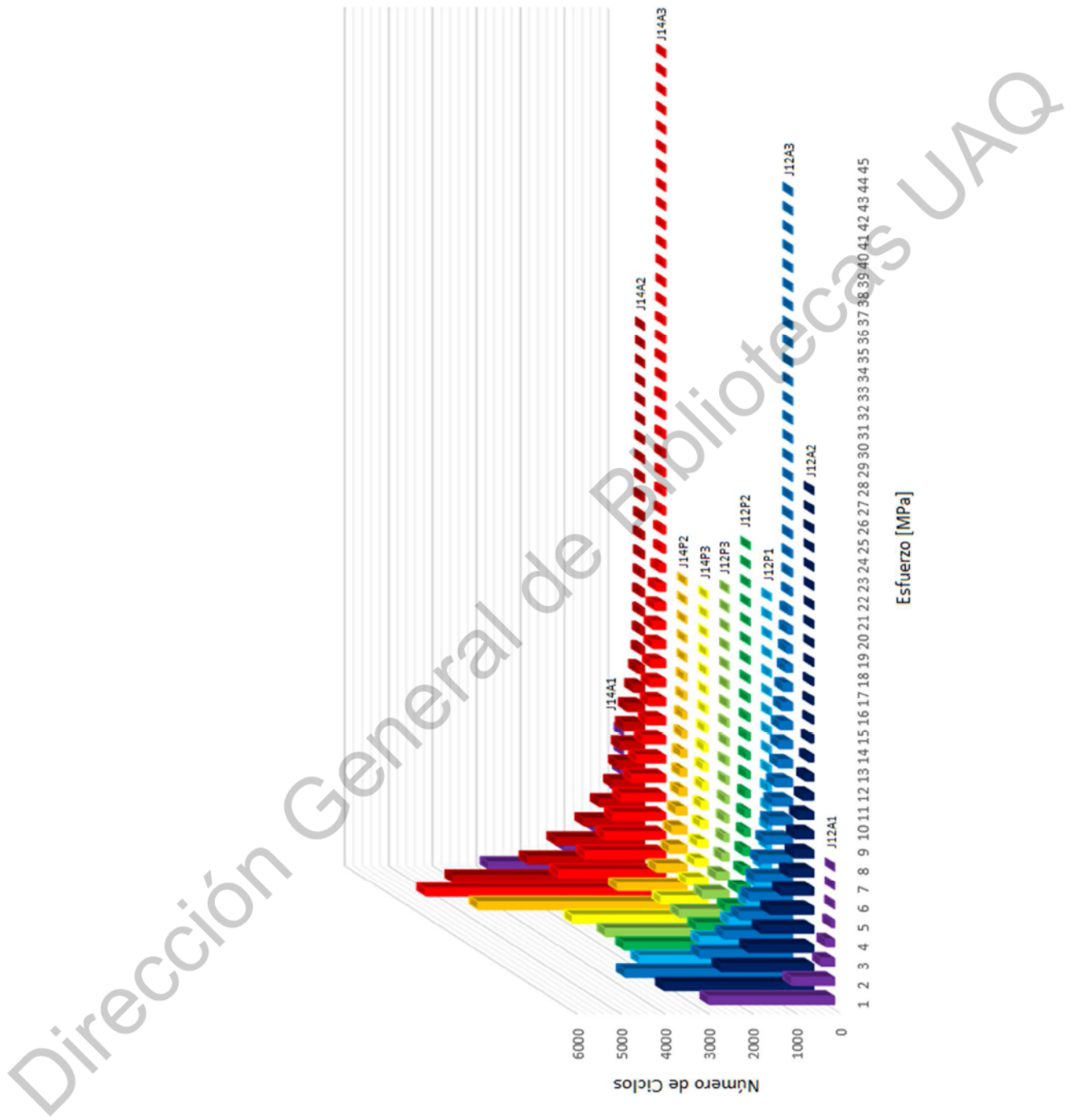
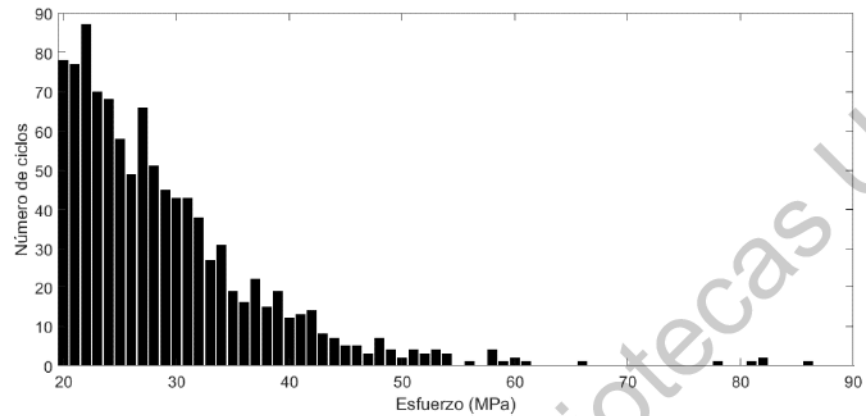
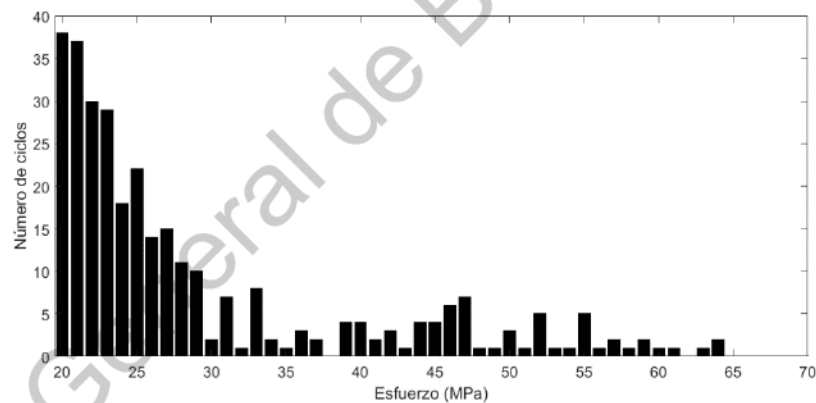


Figura 48. Histogramas de *Rainflow* para registro de 40 horas

La figura 49 muestra los histogramas de *Rainflow* para las galgas críticas (galgas 6 y 10).



a)



b)

Figura 49. Histogramas de *Rainflow*. a) Galga extensométrica 6. b) Galga extensométrica 10.

El comportamiento de los puntos 6 y 10 destacó de los otros puntos analizados en la estructura, ya que de ellos se obtuvieron mayores ciclos para el límite de truncamiento (20 MPa) e incluso se presentaron esfuerzos por arriba de 50 MPa, lo cual no ocurrió en ningún registro de las demás galgas extensométricas.

Para la evaluación de daño y predicción de vida útil, se analizaron las galgas extensométricas del puente de acero de Normandía, a excepción de la posición 9 que falló, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3. Aquí, el porcentaje de daño representa el daño acumulado ponderado a un año, según la frecuencia del tráfico en las horas de medición y el aforo abstraído a falta de registros de deformación a tiempo prolongado. Del daño acumulado se calcula la vida útil según la frecuencia del daño. Las galgas 6 y 10 sufren esfuerzos de mayor magnitud, por lo que presentan la menor cantidad de años de vida útil, recordando que se trata de las galgas al centro de la artesa unida con la placa metálica y en el alma de la artesa, cerca del dobléz superior, donde se concentran esfuerzos. Los demás puntos de medición han presentado menor deformación y, por tanto, esfuerzos menores que se traducen en una vida útil del elemento (ver anexo F).

Tabla 3. Daño acumulado y vida útil de puntos medidos.

Posición	Galga extensométrica	Daño acumulado (año)		Vida útil (años)	
		Clase 50	Clase 71	Clase 50	Clase 71
1	J12A1	0.0000	0.0000	∞	∞
2	J12A2	0.0020	0.0002	493.57	4224.19
3	J12A3	0.0130	0.0024	77.21	417.01
4	J12P1	0.0005	0.0000	1847.28	27598.82
5	J12P2	0.0079	0.0013	127.00	776.75
6	J12P3	0.1055	0.0222	9.48	45.01
7	J14P3	0.0031	0.0003	318.29	2933.39
8	J14P2	0.0032	0.0004	310.70	2723.04
10	J14A3	0.0403	0.0105	24.79	95.44
11	J14A2	0.0095	0.0016	105.70	615.57
12	J14A1	0.0000	0.0000	∞	∞

El puente de Normandía presentó sus puntos críticos de esfuerzo a la mitad de la unión placa-artesa y en el doblado superior del alma de la dovela (artesa), que tienen 45 y 95 años de vida útil respectivamente según el análisis directo.

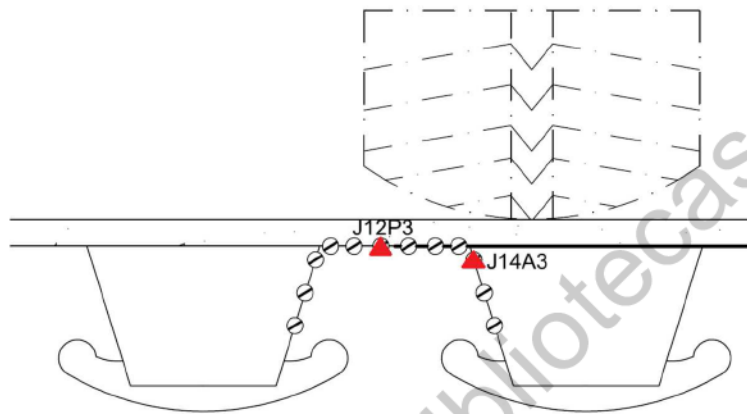


Figura 50. Puntos críticos en el análisis de fatiga y huella de vehículo pesado

La metodología directa proporciona una aproximación aceptable en cuanto al comportamiento general del puente, pero con incertidumbre para la evaluación de la vida útil de los elementos estructurales del puente de acero de Normandía, a través de mediciones de galgas extensométricas y un periodo de medición de poco más de cuatro horas. El monitoreo prolongado de las estructuras lleva a una reducción de la incertidumbre en la evaluación del daño y vida útil; sin embargo, representa un mayor costo y tiempo de análisis debido al tratamiento de datos; a pesar de ello, existe gran interés en su aplicación en el campo de la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías. En concreto, al tener un tiempo prolongado de monitoreo, es posible planificar rehabilitaciones periódicas de las piezas más esforzadas y un panorama del comportamiento general del puente (Dewolf *et al.*, 2002).

La superficie de rodamiento tiene un rol relevante en reducir el rango de esfuerzos transmitido de las llantas en la junta placa-artesa (Xiao *et al.*, 2008) ya que el medio

flexible reparte la carga en un área superior a la de contacto (teóricamente proyectada a 45° siguiendo la profundidad del revestimiento).

El área de contacto entre el neumático y la superficie estructural definen la concentración de esfuerzos en los detalles, lo que significa que un área de contacto mayor distribuye mejor la carga y evita los picos de esfuerzos en los dobleces de las artesas soldadas con la placa portante, por ejemplo. Otro aspecto a revisar es el grosor y longitud de las artesas, el hecho de aumentar estas magnitudes lleva a un mejor rendimiento por fatiga de estos elementos, pero contradice la elección en el diseño geométrico debido a su economía en materiales.

Dirección General de Bibliotecas UAO

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La temperatura juega un papel importante en la transmisión de la carga a la estructura, ya que los vehículos pasan por una capa de pavimento flexible que plásticamente se deforma más en temporadas cálidas. Es por esto, que al haber mayor temperatura la carga está impactando más sobre la estructura que en tiempo de frío. Este fenómeno no se toma en cuenta en el estudio por dos razones: los sensores no van a diferenciar entre las estaciones del año, a excepción por la deriva de temperatura y; segundo, no se cuenta con el tiempo de registro necesario para establecer una relación del aumento o decremento de los esfuerzos según la temporada.

La combinación del uso de registros por monitoreo estructural y modelos numéricos para la obtención del campo de esfuerzos es una técnica asequible en tiempos actuales. El desafío ahora es tener un sistema que estime la vida útil de las estructuras continuamente, a partir de dichos campos de esfuerzos. Por lo anterior, las acciones en cuanto al mantenimiento de los elementos estructurales serán bien fundamentadas y programadas.

El tiempo de medición es un factor importante en la determinación de una mejor descripción de la fatiga sufrida por los elementos estructurales. El hecho de medir un año completo, por ejemplo, dará certeza en la distribución del flujo vehicular por jornada y, para este estudio, confiabilidad en los ciclos que se utilizan en el análisis de fatiga.

Las mediciones de deformación de las galgas tradicionales de puntos sólo revelan información local estructural. Esta característica limita significativamente el desarrollo y la aplicación de la teoría modal de los esfuerzos en ingeniería civil (Zhang *et al.*, 2015). Es importante definir estrategias para la selección de los puntos de conflicto a monitorearse, donde se utilicen la cantidad idónea de instrumentos que se traduzca en un ahorro económico y de tiempo de trabajo.

En esta investigación no se contempla la variación del tráfico vehicular a través del tiempo. Las cargas vehiculares han ido incrementándose significativamente, lo cual puede volverse en riesgo en la serviciabilidad, fatiga o incluso la seguridad de los puentes existentes (Fu y You. 2009). La frecuencia del daño está directamente comprometida con este incremento en el tráfico. Así en una década, el tráfico usual podría ir sobrecargado o al contrario, la afluencia de vehículos podrá verse afectada al construirse nuevas rutas que liberen el tráfico usual sobre los puentes. Con respecto a las cargas y sobrecargas que circulan por las vías de comunicación es importante que las autoridades en vías terrestres estén conscientes del sobrepeso de los vehículos que transitan para contemplarlos en posteriores diseños y/o rehabilitaciones.

Para encontrar la vida remanente real de una estructura es necesario tener la estructura en laboratorio, siendo sometida a cargas representativas de las cargas de servicio reales. La consecución de dichas cargas en la experimentación juega un papel vital en la determinación de una vida útil real de la estructura (Ali, Shahzad & Khan, 2016).

El algoritmo de análisis de fatiga se implementó para el caso del puente de Normandía en Francia, así como se programó dentro del software DEEFEP para la opción de la herramienta del análisis a través de registros de extensómetro.

CONCLUSIONES

El monitoreo de estructuras provee información precisa al estar relacionada con fenómenos físicos *in situ* y al evitar ambigüedades que resultan de las simplificaciones de estudios analíticos. Además de ello, es recomendable el uso de información estadística para ver la evolución de diferentes fenómenos (deformaciones, esfuerzos, tráfico, temperatura, carga, etcétera).

El comportamiento de la estructura puede estudiarse y evaluarse continuamente con sistemas de monitoreo a largo plazo; al procesar la información medida por los sensores es posible evaluar el estado actual y, también, optimizar los trabajos de mantenimiento de la estructura (Dudás *et al.*, 2015).

Es urgente adoptar nuevas teorías y nuevos efectos para estudiar y desarrollar dispositivos de monitoreo de puentes que sean confiables, estables y duraderos (Zhou *et al.*, 2017). Así como es conveniente realizar un análisis de históricos de esfuerzos en los puentes (cada diez años, por ejemplo), donde la evolución del tráfico y de las cargas que pasan por la estructura quede descubierta y sea posible estimar dichas variables para predicciones precisas.

Se mejora la precisión de las mediciones con instrumentos más completos (arreglos de diversas galgas extensométricas o sensores de fibra óptica), donde se reduzca la influencia de la temperatura a un mínimo, así como la interferencia aleatoria que pudiera existir en las mediciones, lo que ayudaría a disminuir el tratamiento computacional previo de los datos. Además, con otro tipo de sensores se conciben mediciones globales de una estructura o sección de ella, y no solo un punto como ocurre con las galgas extensométricas. Más aun, el incorporar sistemas de monitoreo de salud estructural de tipo *Weigh-In-Motion* (WIM) combinado al análisis estructural con líneas o superficies de influencia, proporciona información sobre la localización de los puntos de interés donde es probable conseguir esfuerzos mayores, así como información de la distribución de cargas y tráfico en puentes.

El análisis de fatiga con registros a corto plazo (días, semanas o par de meses) no es adecuado para mostrar un comportamiento correcto del puente, ni una vida útil precisa (Deng *et al.*, 2015). Por tanto, es ideal tener históricos de deformaciones de múltiples años para predicciones precisas.

El uso del método de elementos finitos es de gran soporte al análisis de fatiga. Sin embargo, se recomiendan previos análisis de convergencia para el tipo de malla y su tamaño, así como la correcta elección del tipo de elemento a utilizar (*Shell* o volumétrico). También, la modelización completa de la estructura aporta otra información relevante, como lo son parámetros modales y coeficiente de amortiguamiento.

REFERENCIAS

Ali, D., Shahzad, A., Khan, T. A. 2016. *Development of Fatigue Loading Spectra from Flight Test Data*. *Procedia Structural Integrity*, 2, 3296–3304. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.411>

Álvarez, J. 2017. *Calibración y validación de modelo de predicción de vida útil a fatiga para puentes de concreto presforzado*. Tesis. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro. México.

ASCE. Committee on Fatigue and Fracture Reliability of the Committee on Structural Safety and Reliability of the Structural Division. 1982. *Fatigue Reliability 1-4*. *Journal of the Structural Division, ASCE*; 108 (STI):3-88.

Ataei, S., Aghakouchak, A. A., Marefat, M. S., & Mohammadzadeh, S. 2005. *Sensor fusion of a railway bridge load test using neural networks*. *Expert Systems with Applications*, 29(3), 678–683. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.04.038>

Bárceñas, V. 2011. *Desarrollo de un programa de cómputo para el análisis estadístico de cargas vehiculares en movimiento y sus efectos de fatiga en puentes de acero*. Tesis. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro. México.

Broek, D. 1986. *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Martinus Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands, 4th. Edition.

Brownjohn, J. M. W., Koo, K. Y., Scullion, A., & List, D. 2015. *Operational deformations in long-span bridges*. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(4), 556–574. <https://doi.org/10.1080/15732479.2014.951857>

Casas, J. R., & Cruz, P. J. S. 2003. *Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring*. *Journal of Bridge Engineering*, 8(6), 362–373. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2003\)8:6\(362\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2003)8:6(362))

Catbas, F. N., Susoy, M., & Frangopol, D. M. 2008. *Structural health monitoring and reliability estimation: Long span truss bridge application with environmental monitoring data*. *Engineering Structures*. 30, 2347–2359. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.013>

Crespo, E., Carri, F., Juan, V., & Quintana, A. 2013. *Análisis del deterioro estructural por fatiga y prognosis de un puente típico de concreto utilizando simulación MonteCarlo*. Publicación Técnica No.379, Instituto Mexicano Del Transporte, (379), 118.

Cullington, D. W. & Hoar, M. C. P. 1975. *Correcting for the effects of temperature on strain gauges-use of computer-logger on Milford Haven Bridge Project*. Strain: An international Journal for Experimental Mechanics. Volume 11 (3). <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.1975.tb00146.x>

De Backer, H., Outtier, A., & Bogaert, P. Van. 2007. *High precision strain gauge measurements in areas of high stress concentrations of orthotropic plated bridge decks*. OR Insight. <https://doi.org/10.1784/insi.2007.49.7.384>

De Freitas M. G. R., F. 2012. *Influence du Revêtement sur le Comportement en Fatigue des Dalles Orthotropes : Étude d'une solution en BFUP*. Thèse. École Doctorale Sciences Ingénierie et Environnement. Université Paris-Est.

Deng Y., Liu, Y., Feng, D.-M. & Li, A.-Q. 2015. *Investigation of fatigue performance of welded details in long-span steel bridges using long-term monitoring strain data*. Structural Control and Health Monitoring, 22, 1343–1358. DOI: 10.1002/stc.1747

Dewolf, J. T., Lauzon, R. G., & Culmo, M. P. 2002. *Monitoring Bridge Performance*. Structural Health Monitoring. Vol. 1(2), 129–138.

Dudás, K., Jakab, G., Kövesdi, B., & Dunai, L. 2015. *Assessment of Fatigue Behaviour of Orthotropic Steel Bridge Decks using Monitoring System*. Procedia Engineering, 133, 770–777. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.660>

Emoto, H., Takahashi, J., Widyawati, R., & Miyamoto, A. 2014. *Performance evaluation and remaining life prediction of an aged bridge by J-BMS*. Procedia Engineering, 95(Scescm), 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.166>

EN1991-1-1, 2002. *Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-1: General actions –Densities, self-weight, imposed loads for buildings*, European Standard, Brussels, CEN,

EN1991-2, 2003. *Eurocode 1: Actions on Structures – Part 2: Traffic Loads on Bridges*, European Standard, Brussels, CEN,

EN1993-1-9, 2003. *Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-9: Fatigue*, European Standard, Brussels, CEN,

Fasl, J., Helwig, T., & Wood, S. L. 2016. *Fatigue Response of a Fracture-Critical Bridge at the End of Service Life*. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(5), 1–7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000871](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000871)

Fatemi, A. and Yang, L. 1998. *Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: A Survey of the State of the Art for Homogeneous Materials*. *Int. J. Fatigue*, Vol. 20, No. 1.

Fu, G. and You, J. 2009. *Truck loads and bridge capacity evaluation in China*. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp.327–335.

García, R. A., J. A. López, F. J. Carrión, M. Á. Pérez Lara, A. Hernández, J. A. Quintana, S. E. Crespo, and M. A. Montes. 2013. *Análisis de deterioro por fatiga en torones de presfuerzo utilizados en puentes*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes e Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 385. Sanfandila, Querétaro. México.

Herrada J. 2013. *Sistematización del análisis del comportamiento de puentes carreteros ante escenarios de tráfico pesado*. Tesis. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro. México.

Hong, W., Cao, Y., & Wu, Z. 2016. *Strain-Based Damage-Assessment Method for Bridges under Moving Vehicular Loads Using Long-Gauge Strain Sensing*. *Journal of Bridge Engineering*, 21(10), 4016059. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000933](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000933)

Jacob B., Eymard R. 1989. *Un nouveau logiciel: le programme Castor pour le calcul des actions et sollicitations du trafic dans les ouvrages routiers*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France.

Jan, M. T., Hisham, N., Hamid, B., Khir, M. H., Ashraf, K., & Shoaib, M. 2014. *Reliability and Fatigue Analysis in Cantilever-Based MEMS Devices Operating in Harsh Environments*.

Journal of Quality and Reliability Engineering. Volume 2014.
<https://doi.org/10.1155/2014/987847>

Johnson, N. R. 2015. *Testing of Rainflow Histograms of Strain for Implementation as a Bridge Weigh-in-Motion Technique*. Thesis. Utah State University. Utah. United States.

JRC and ECCS. 2008. *Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life*. Joint Research Centre, European Commission. EUR 23252 EN – 2008. Brussels.

Kamnik, R., Kovačič, B., Štrukelj, A., Vatin, N., & Murgul, V. 2015. *Preparation, Installation and Signal Processing of Strain Gauges in Bridge Load Testing*. Applied Mechanics and Materials, 725, 903–912. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.903>

Kashefi, K., Zandi, A. P., & Zeinoddini, M. 2010. *Fatigue life evaluation through field measurements and laboratory tests*. Procedia Engineering, 2(1), 573–582. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.062>

Kovačič, B., Kamnik, R., Štrukelj, A., & Vatin, N. 2015. *Processing of signals produced by strain gauges in testing measurements of the bridges*. Procedia Engineering, 117(1), 800–806. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.249>

Kużawa, M., Kamiński, T., & Bień, J. 2018. *Fatigue assessment procedure for old riveted road bridges, Fatigue assessment procedure for old riveted road bridges*. ScienceDirect. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.03.005>

Lee, S. Y., & Yhim, S. S. 2005. *Dynamic behavior of long-span box girder bridges subjected to moving loads: Numerical analysis and experimental verification*. International Journal of Solids and Structures, 42(18–19), 5021–5035. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.02.020>

Lu, N., Beer, M., Asce, M., Noori, M., & Liu, Y. 2017. *Lifetime Deflections of Long-Span Bridges under Dynamic and Growing Traffic Loads*. ASCE 22(2012), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001125).

Lu, N., Liu, Y., & Beer, M. 2018. *Extrapolation of extreme traffic load effects on a cable-stayed bridge based on weigh-in-motion measurements*. International Journal of Reliability and Safety. Vol. 12, 69–85.

Medina, J. 2014. *Efectos de fatiga y extremos en puentes de concreto presforzado ante cargas de vehículos pesados*. Tesis. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro. México.

Moreno, A. 2016a. *Simulación de escenarios de tráfico pesado y calibración con cargas de diseño para puentes mexicanos, basado en Registros WIM franceses*. Tesis. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro. México.

Moreno, B. 2016b. *Efectos de la evolución del agrietamiento del concreto en la fatiga y extremos de puentes de concreto presforzado ante tráfico pesado*. Tesis. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro. México.

Nagy, W., Van Bogaert, P. and De Backer, H. 2015. *LEFM Based Fatigue Design for Welded Connections in Orthotropic Steel Bridge Decks*. Procedia Engineering, Vol. 133, pp. 758–769.

O'Brien, E. J., Lipari, A., & Caprani, C. C. 2015. *Micro-simulation of single-lane traffic to identify critical loading conditions for long-span bridges*. Engineering Structures, 94, 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.02.019>

Oka, V. G., Hopwood, T., & Hawk, I. E. 1989. *Fatigue analysis of steel bridges using a portable microcomputer based strain gage system*. Computers and Structures, 31(2), 151–186. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(89\)90223-X](https://doi.org/10.1016/0045-7949(89)90223-X)

Omishore, A. 2017 *Assessment of Steel Bearing Structures - Estimation of the Remaining Fatigue Life*. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 245 032027

Seçil, Ariduru. 2004. *Fatigue Life Calculation By Rainflow Cycle Counting Method*. Thesis. Middle East Technical University.

Saviotti, A. 2014. *Bridge Assessment, Management and Life Cycle Analysis*. Modern Applied Science. Vol. 8(3), 167–181. <https://doi.org/10.5539/mas.v8n3p167>

Sousa, H., Bento, J., & Figueiras, J. 2013. *Construction assessment and long-term prediction of prestressed concrete bridges based on monitoring data*. Engineering Structures, 52, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.003>

Tang, M. C. 2017. *Super-long span bridges*. Structure and Infrastructure Engineering, 13(6), 722–730. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1187635>

Teixeira de Freitas, S. & Kolstein, H. 2012. *Structural Monitoring of a Strengthened Orthotropic Steel Bridge Deck using Strain Data*. Structural Health Monitoring, (September). <https://doi.org/10.1177/1475921712449507>

Wang, Y., Li, Z.X. and Li, A. Q. 2010. *Combined use of SHMS and finite element strain data for assessing the fatigue reliability index of girder components in long-span cable-stayed bridge*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 54, No. 2, pp. 127–136.

Widyawati, R., Takahashi, J., Emoto, H., & Miyamoto, A. 2014. *Remaining life prediction of an aged bridge based on concrete core test*. Procedia Engineering, 95(Scescm), 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.168>

Wiberg, J., & Karoumi, R. 2009. *Monitoring dynamic behaviour of a long-span railway bridge*. Structure and Infrastructure Engineering, 5(5), 419–433. <https://doi.org/10.1080/15732470701478578>

Wu, B., Wu, G., Yang, C., & He, Y. 2016. *Damage identification and bearing capacity evaluation of bridges based on distributed long-gauge strain envelope line under moving vehicle loads*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 27(17), 2344–2358. <https://doi.org/10.1177/1045389X16629571>

Wu, S. Q. and Law, S. S. 2010. *Dynamic analysis of bridge-vehicle system with uncertainties based on the finite element model*. Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 25, No. 4, pp. 425–432.

Xiao, Z-G., Yamada, K., Ya, S., Zhao, X-L. 2008. *Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks*. International Journal of Fatigue, 30, 1387–1397. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.10.008>

Xu, You-Lin, & Xia, Yong. 2012. *Structural Health Monitoring of Long-span Suspension Bridges*. Spong Press. <https://doi.org/10.1201/b13182>

Yang, Y., Li, Q. S., & Yan, B. W. 2017. *Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China*. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1177/1687814016684272>

Ye, X. W., Su, Y. H., & Han, J. P. 2014. *A state-of-the-art review on fatigue life assessment of steel bridges*. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/956473>

Zhang, J. and Au, F.T.K. 2017. *Fatigue reliability assessment considering traffic flow variation based on weigh-in-motion data*. *Advances in Structural Engineering*, Vol. 20, No. 1, pp.125–138.

Zhang, J., Guo, S. L., Wu, Z. S., & Zhang, Q. Q. 2015. *Structural identification and damage detection through long-gauge strain measurements*. *Engineering Structures*, 99, 173–183. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.04.024>


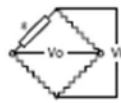

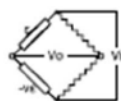





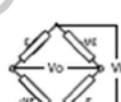

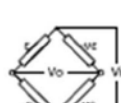

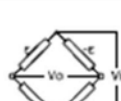
Zhang, J., Yongding, T., Yang, C., Wu, B., Wu, Z., Wu, G., Zhang & Zhou, L. 2016. *Vibration and Deformation Monitoring of a Long-span Rigid-frame Bridge with Distributed Long-gauge Sensors*. *Journal of Aerospace Engineering*. Vol. 30. 81–86. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000678](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000678)

Zhou, J., Li, X., Xia, R., Yang, J., & Zhang, H. 2017. *Health Monitoring and Evaluation of Long-Span Bridges Based on Sensing and Data Analysis : A Survey*. *Sensors (Basel)*, 17 (3). <https://doi.org/10.3390/s17030603>

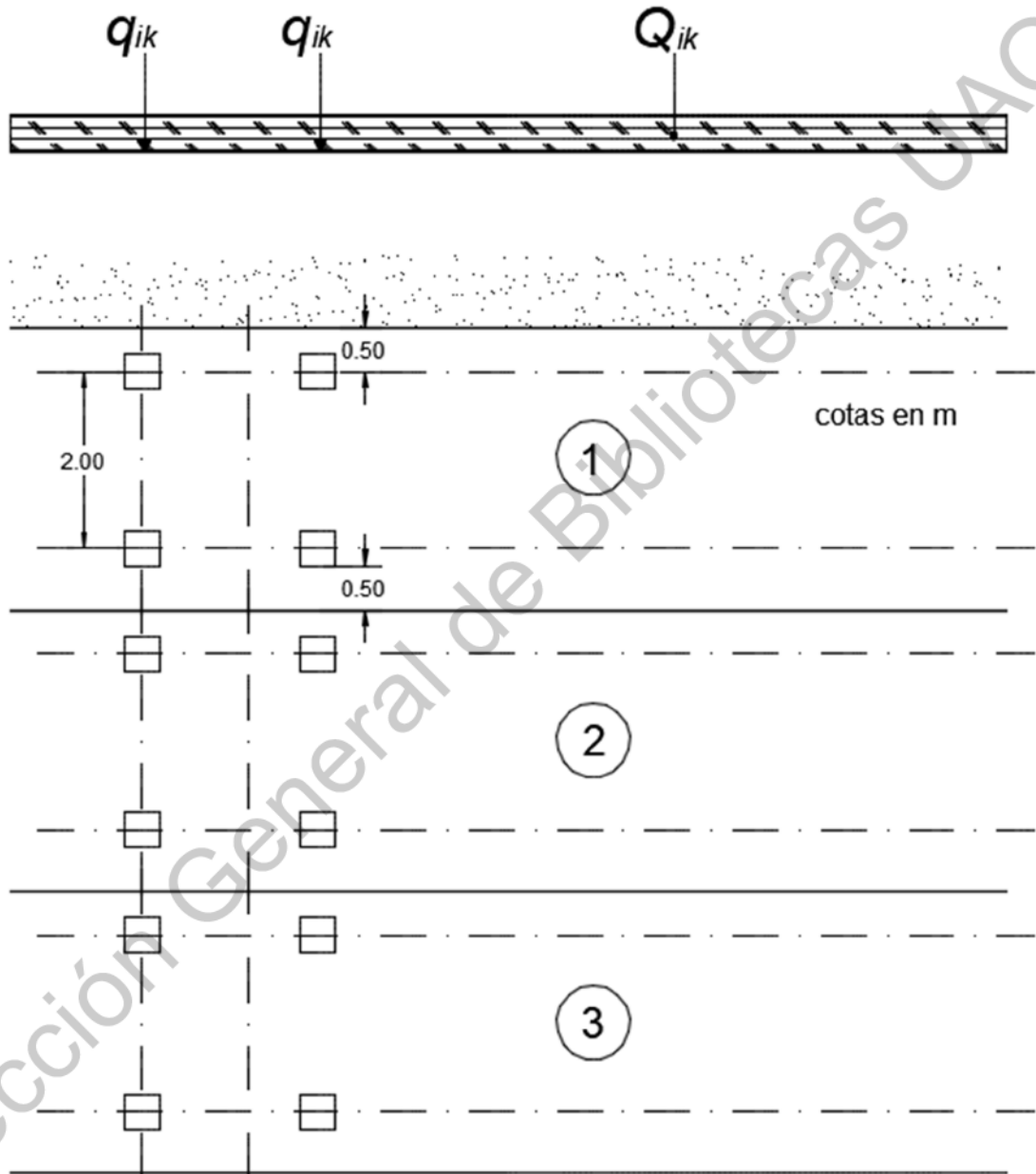
Zhu, D. Y., Zhang, Y. H., & Ouyang, H. 2015. *A linear complementarity method for dynamic analysis of bridges under moving vehicles considering separation and surface roughness*. *Computers and Structures*, 154, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.03.015>

ANEXOS

ANEXO A. Configuraciones de galga extensométrica en puente de Wheatstone

Magnitud física	Arreglo	Puente	V_o/V_i	Factor de Puente	Características
 Tensión / Compresión	1/4 de puente		$\frac{k \cdot \varepsilon}{4 + 2 \cdot k \cdot \varepsilon}$	1	Configuración básica para medición de tensión y compresión.
 Tensión / Compresión	1/2 de puente		$\frac{k \cdot \varepsilon \cdot (1 + \nu)}{4 + 2 \cdot k \cdot \varepsilon \cdot (1 - \nu)}$	$1 + \nu$	Configuración para compensación de temperatura. Una galga en dirección del elemento, la otra perpendicular a él.
 Flexión	1/2 de puente		$\frac{k \cdot \varepsilon}{2}$	2	Configuración con dos galgas a lados opuestos para medición de flexión
 Tensión / Compresión	1/2 de puente		$\frac{k \cdot \varepsilon}{2 + k \cdot \varepsilon}$	2	Configuración con dos galgas paralelas a lados opuestos para despreciar el efecto de flexión
 Tensión / Compresión	Puente completo		$\frac{k \cdot \varepsilon \cdot (1 + \nu)}{2 + k \cdot \varepsilon \cdot (1 - \nu)}$	$2 (1 + \nu)$	Configuración con cuatro galgas activas que cancela la flexión y compensa el efecto de la temperatura
 Flexión	Puente completo		$\frac{k \cdot \varepsilon \cdot (1 + \nu)}{2}$	$2 (1 + \nu)$	Configuración con cuatro galgas activas que cancela la deformación axial y compensa el efecto de la temperatura
 Flexión / torsión	Puente completo		$k \cdot \varepsilon$	4	Configuración con cuatro galgas activas que se utiliza mayormente en estudios de flexión



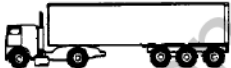


ANEXO B. Modelos de carga por fatiga EN-1991-2: Cargas de tráfico en puentes



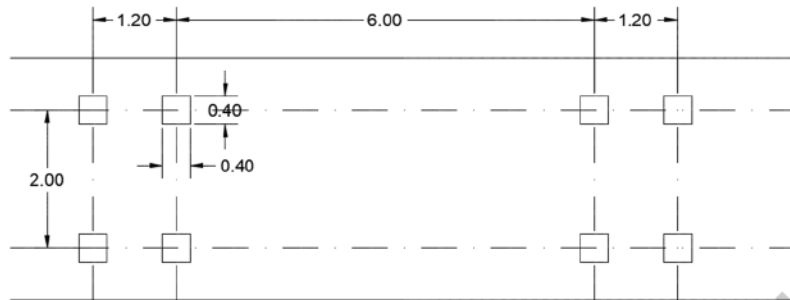
Sistema Tándem y Uniformemente distribuido con diferentes carriles. Modelo de carga por fatiga FLM1

Posición	Sistema Tándem q_k [KN]	Uniformemente distribuida Q_{ik} [KN/m ²]
Carril No. 1	300	9
Carril No. 2	200	2.5
Carril No. 3	100	2.5
Otros carriles	0	2.5
Área sobrante	0	2.5

Tabla de valores de carga. Modelo de carga por fatiga FLM1






Camión	Distancia entre ejes [m]	Carga por eje [kN]	Tipo de Neumático
	4.50	90 190	A B
	4.20 1.30	80 140 140	A B B
	3.20 5.20 1.30 1.30	90 180 120 120 120	A B C C C
	3.40 6.00 1.80	90 190 140 140	A B B B
	4.80 3.60 4.40 1.30	90 180 120 110 110	A B C C C

Vehículos pesados frecuentes. Modelo de carga por fatiga FLM2

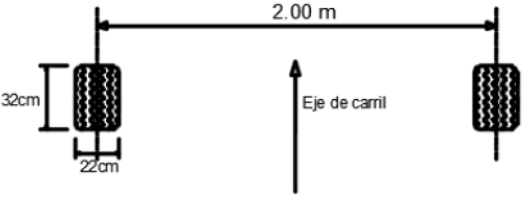
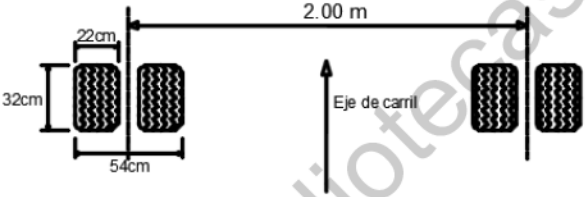
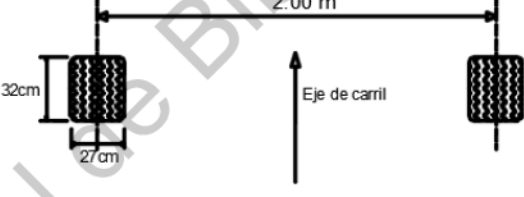


cotas en m

Distribución geométrica de vehículo. Modelo de carga por fatiga FLM3

Tipo de vehículo	Distancia entre ejes [m]	Carga por eje [kN]	Porcentaje de tráfico pesado			Tipo de neumático
			Larga distancia	Media distancia	Tráfico local	
	4.50	70 130	20.00	50.00	80.00	A B
	4.20 1.30	70 120 120	5.00	5.00	5.00	A B B
	3.20 5.20 1.30 1.30	70 150 90 90 90	40.00	20.00	5.00	A B C C C
	3.40 6.00 1.80	70 140 90 90	25.00	15.00	5.00	A B B B
	4.80 3.60 4.40 1.30	70 130 90 80 80	10.00	10.00	5.00	A B C C C

Vehículos pesados equivalentes. Modelo de carga por fatiga FLM4

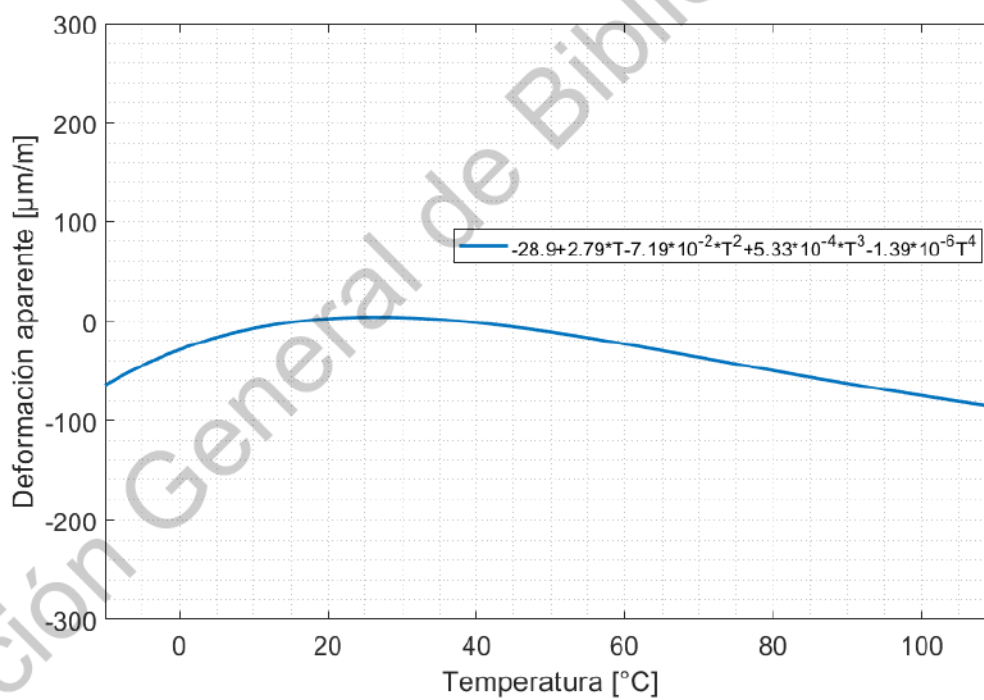
Tipo de neumático	Definición geométrica
A	
B	
C	

Definición de tipos de neumático y distancia entre ejes

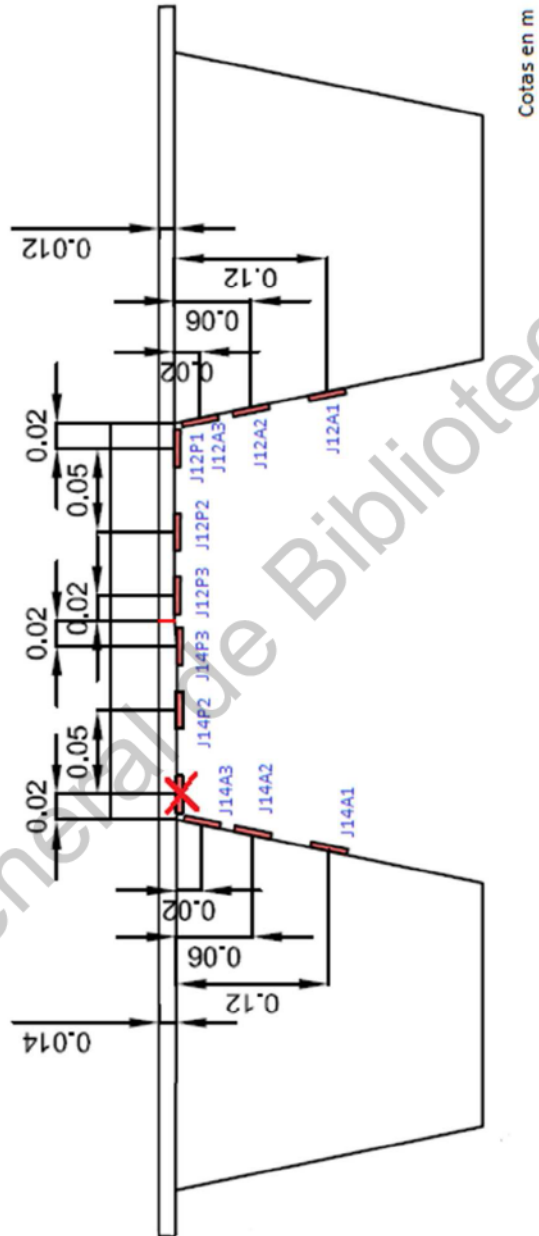
ANEXO C. Hoja técnica de lote de galgas extensométricas

Tipo de Galga : <u>FLA - 5 - 11</u>	Probado en : <u>SS 400</u>
Lote No. : <u>A515611</u>	Coficiente de Expansión Térmica : <u>11.8</u> $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Factor de Galga : <u>2.11</u> ± 1	Coficiente de Temperatura de Factor de Galga : <u>+0.1</u> ± 0.05 $/ 10^\circ\text{C}$
Adhesivo : <u>P - 2</u>	Data No. : <u>A0568</u>



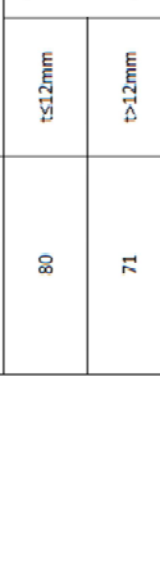
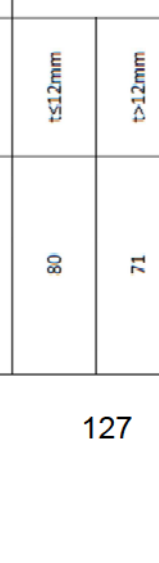


Respuesta térmica (ϵ_{app} : Deformación aparente)
Tolerancia : ± 0.85 [$\mu\text{m}/\text{m}$]/ $^\circ\text{C}$
T = Temperatura

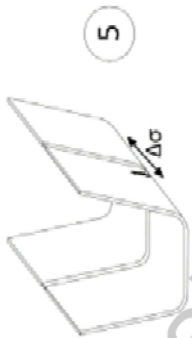
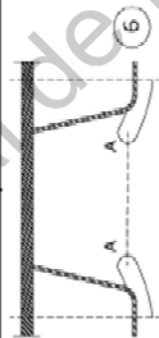
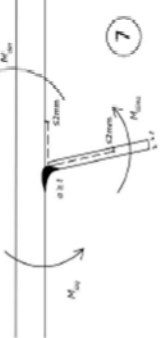

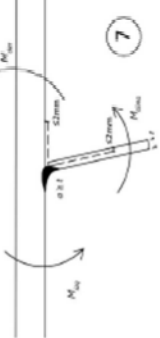



ANEXO D. Medidas de localización de galgas extensométricas en puente de Normandía

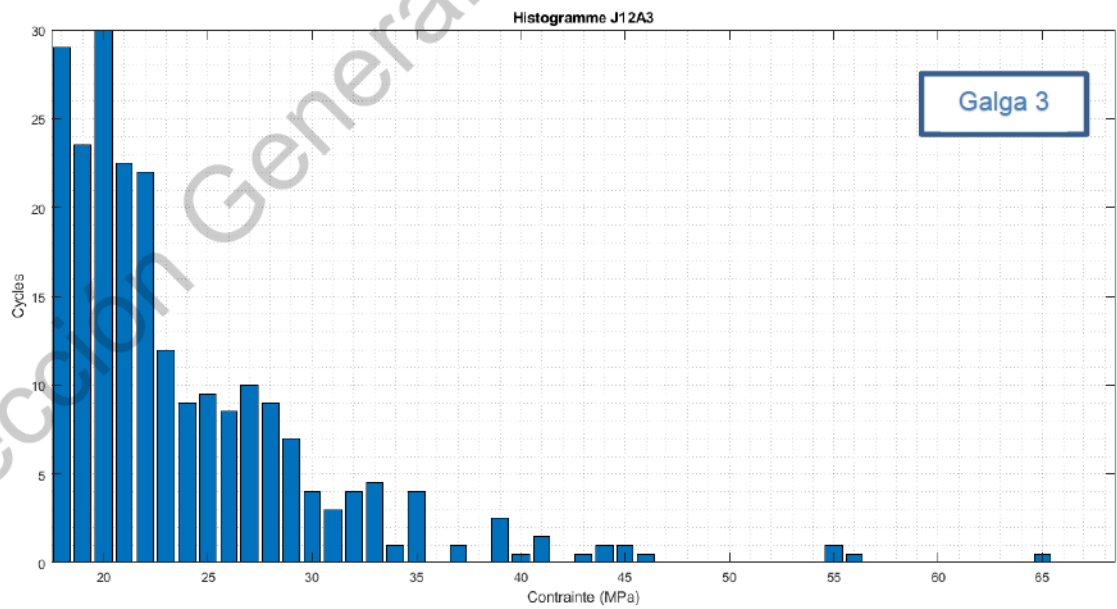
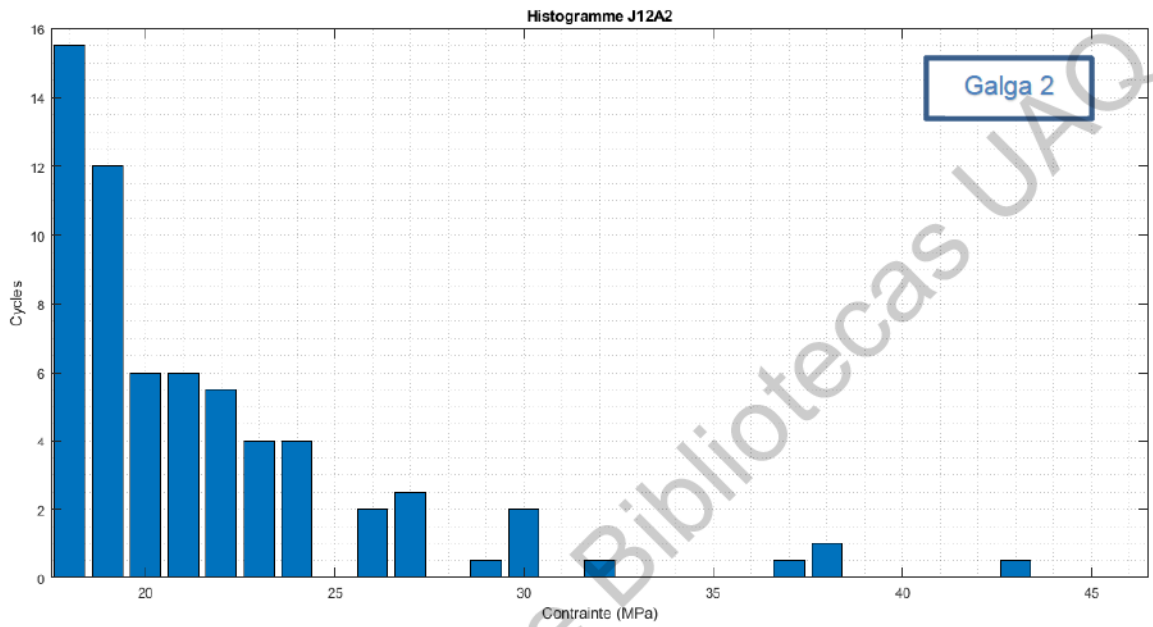


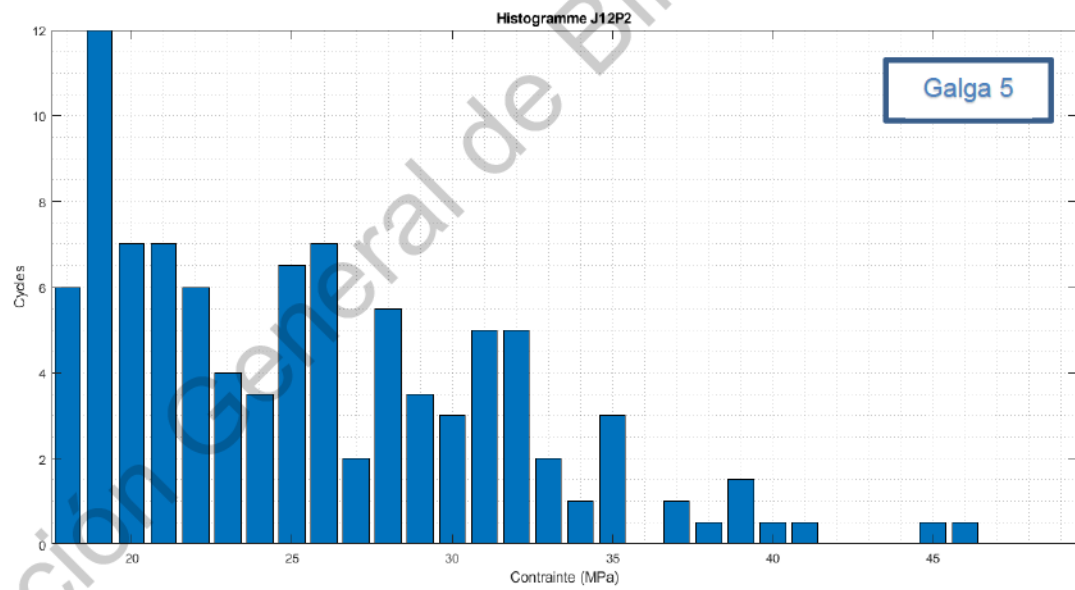
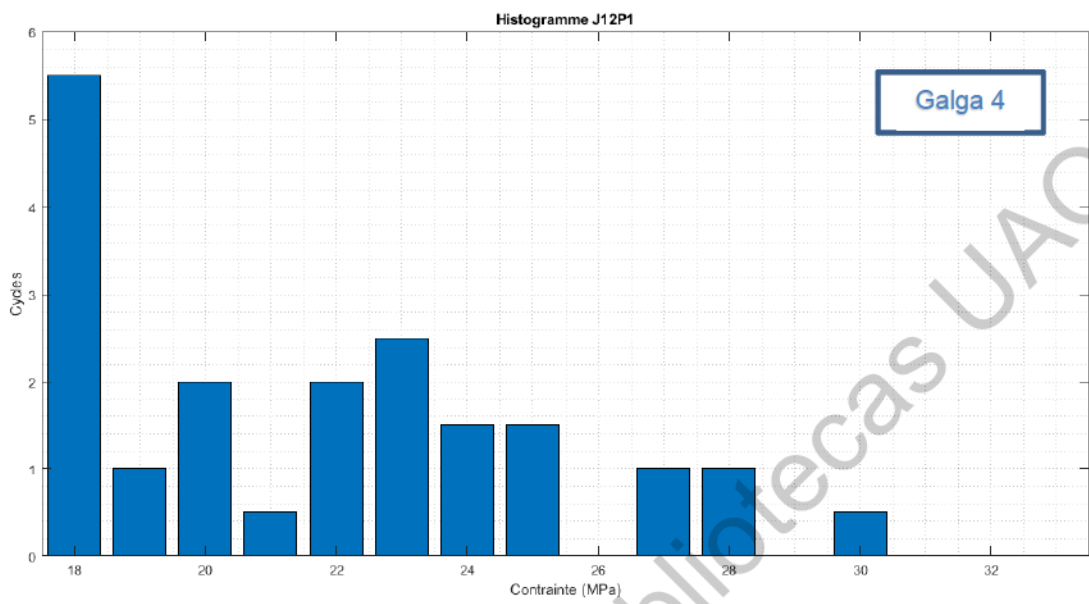
ANEXO E. Categoría de Detalles (EN-1993-1-9)

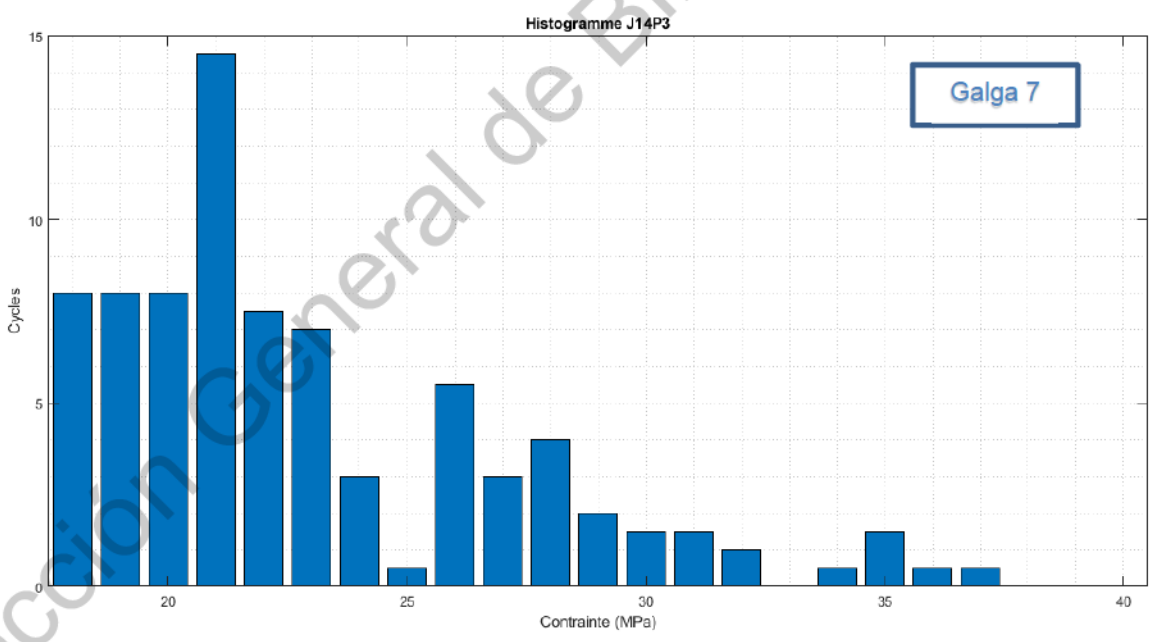
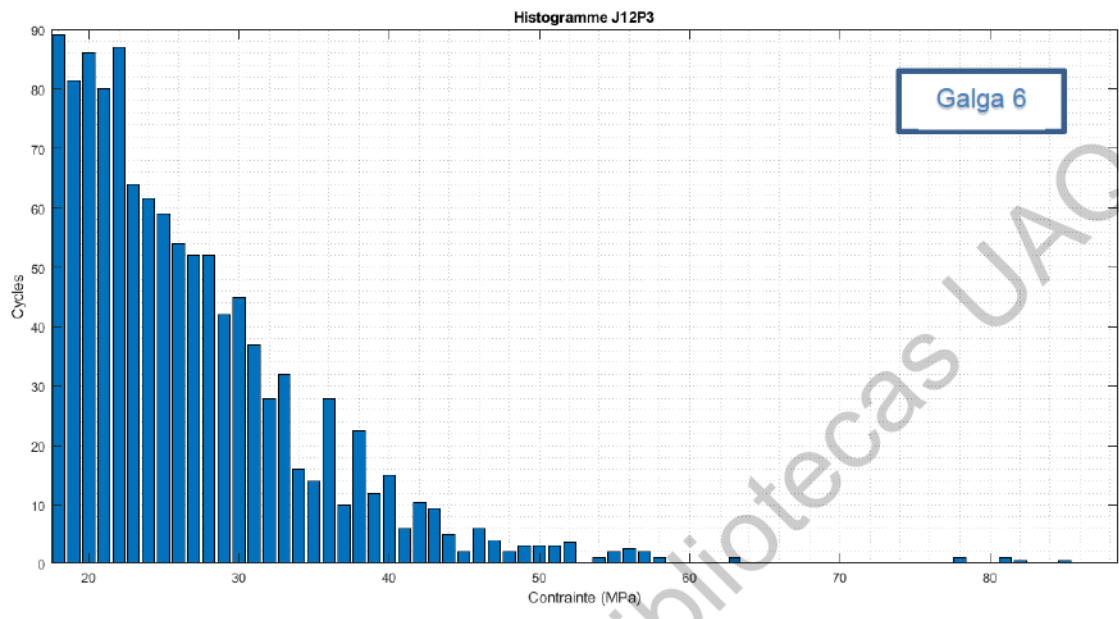
Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
80	$t \leq 12\text{mm}$		1) Larguero longitudinal continuo, con recorte en unión con diafragmas	1) Evaluación basada en rango de esfuerzos directo ($\Delta\sigma$) en larguero longitudinal
71	$t > 12\text{mm}$			
80	$t \leq 12\text{mm}$		2) Larguero longitudinal continuo, sin recorte en unión con diafragmas	2) Evaluación basada en rango de esfuerzos directo ($\Delta\sigma$) en diafragma
71	$t > 12\text{mm}$			
36			3) Larguero longitudinal continuo separado a cada lado de diafragma	3) Evaluación basada en rango de esfuerzos directo ($\Delta\sigma$) en diafragma
71			4) Junta en costilla, soldadura a tope de penetración completa con placa de soporte	4) Evaluación basada en rango de esfuerzos directo ($\Delta\sigma$) en diafragma

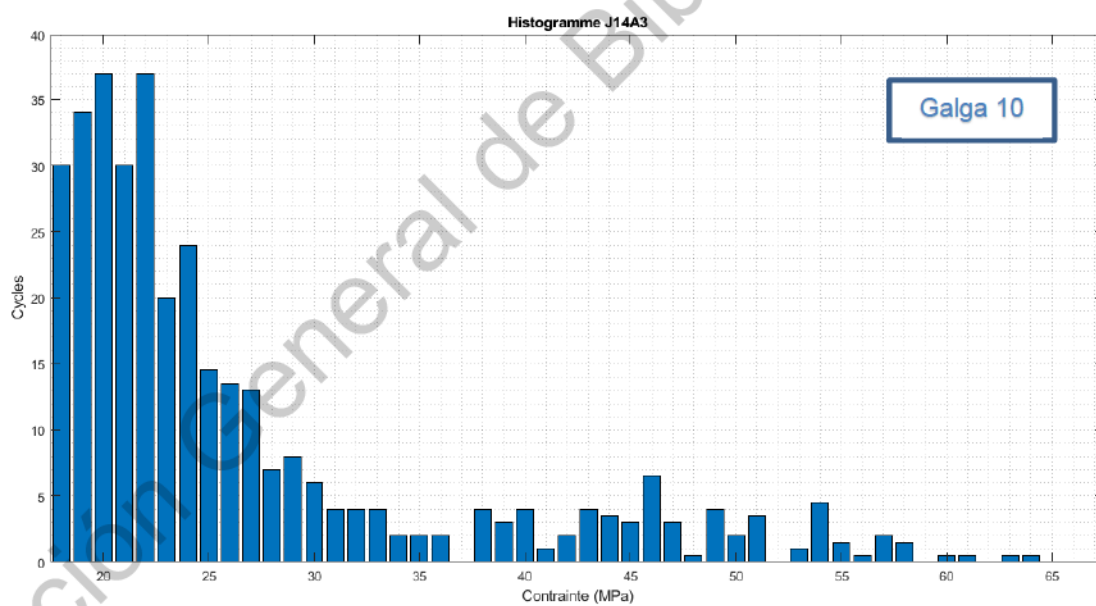
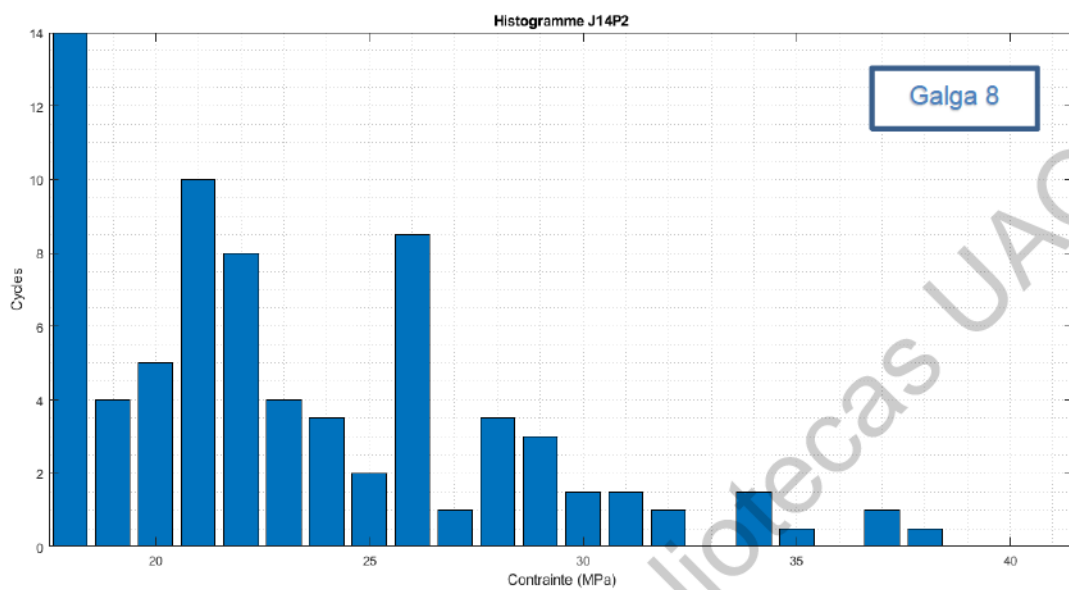
Categoría de detalle	Detalle constructivo		Descripción	Requisitos
112	Revisar detalles 1), 2) y 4) de Tabla 8.3 en EN-1993-1-9		5) Soldadura a tope de penetración completa en costilla, por ambos lados y sin placa de soporte	5) Evaluación basada en rango de esfuerzos directo ($\Delta\sigma$) en diafragma. Puntos de soldadura dentro de la soldadura a tope
90	Revisar detalles 5) y 7) de Tabla 8.3 en EN-1993-1-9			6) Evaluación basada en rango de esfuerzos en sección crítica tomando en cuenta los efectos de Vierendeel Nota: En caso de utilizar el rango de esfuerzos según EN 1993-2:9.4.2.2 (3), la categoría de detalle 112 puede ser utilizada
80	Revisar detalles 9) y 11) de Tabla 8.3 en EN-1993-1-9			6) Sección crítica en alma de diafragma debido a huecos de concentración de esfuerzos
71			7) Soldadura conectando placa portante a artesa de sección trapezoidal o en "V". 7) Soldadura de penetración parcial con $a \geq t$	7) Evaluación basada en rango de esfuerzos de flexión directo de la placa
71			8) Soldadura de filete o penetración parcial que no entren en el detalle 7)	8) Evaluación basada en rango de esfuerzos de flexión directo de la placa

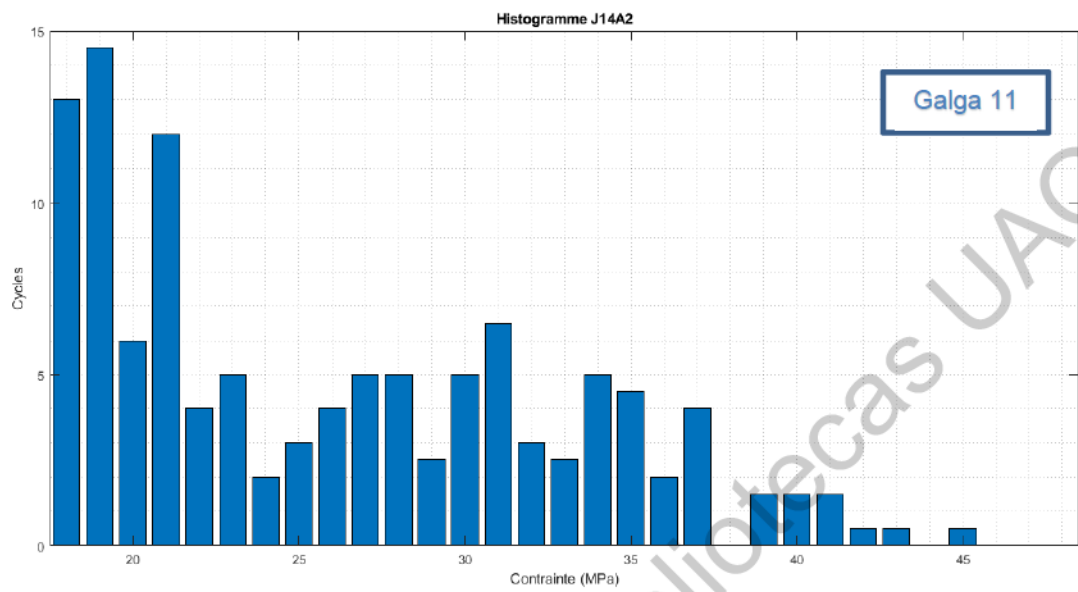
ANEXO F. Histogramas de Rainflow
 (Se omiten galgas que presentan valores nulos)
DETALLE 50



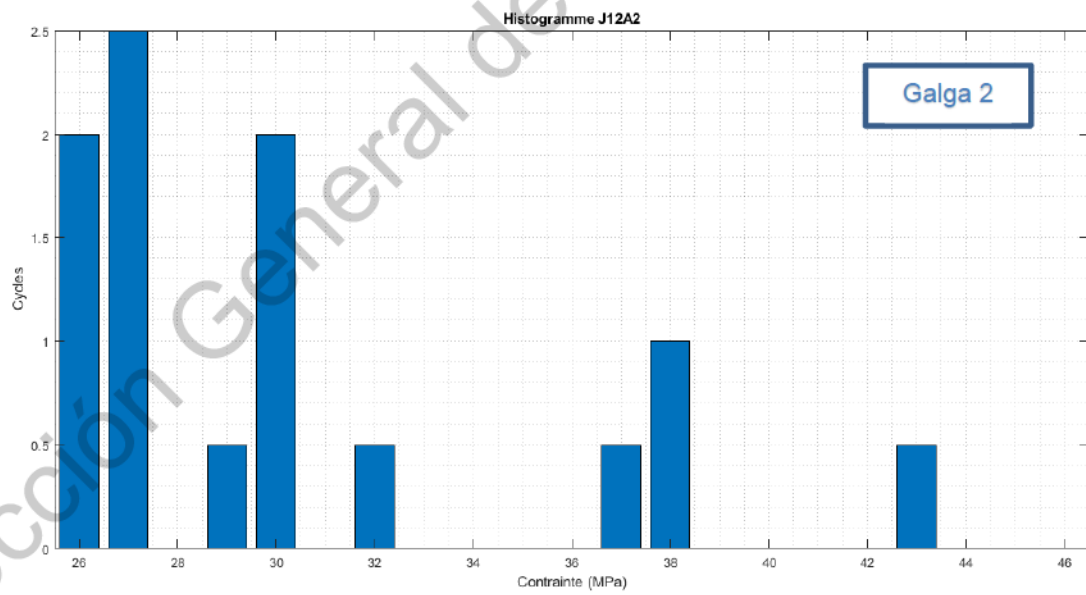


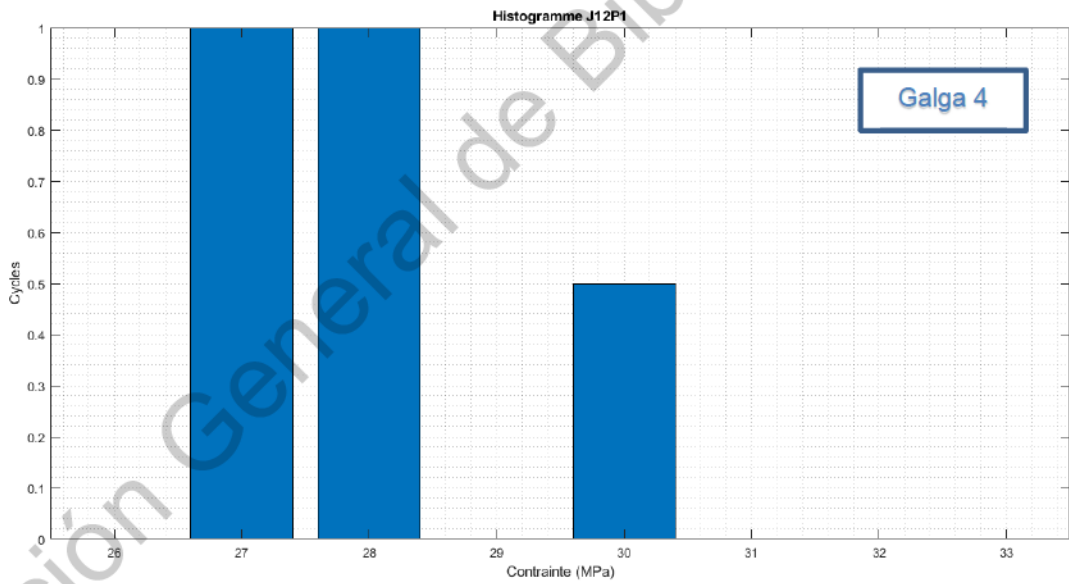
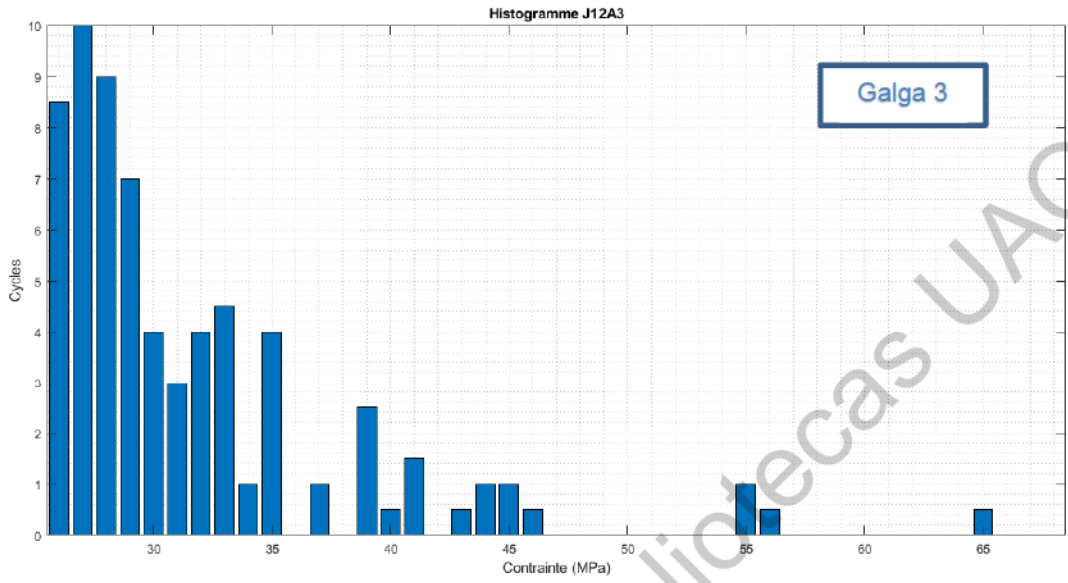


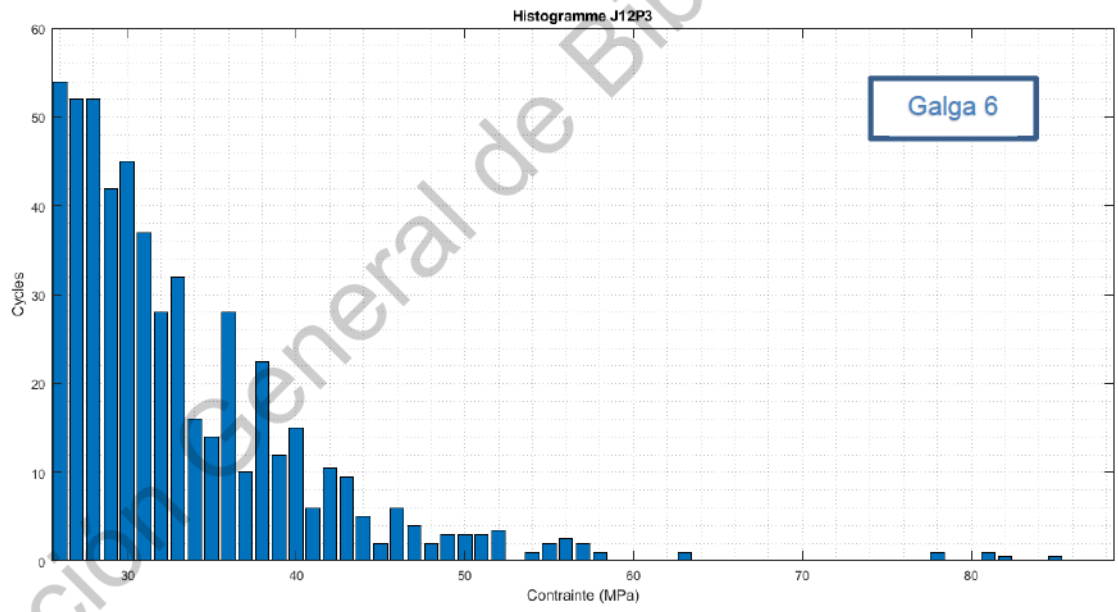
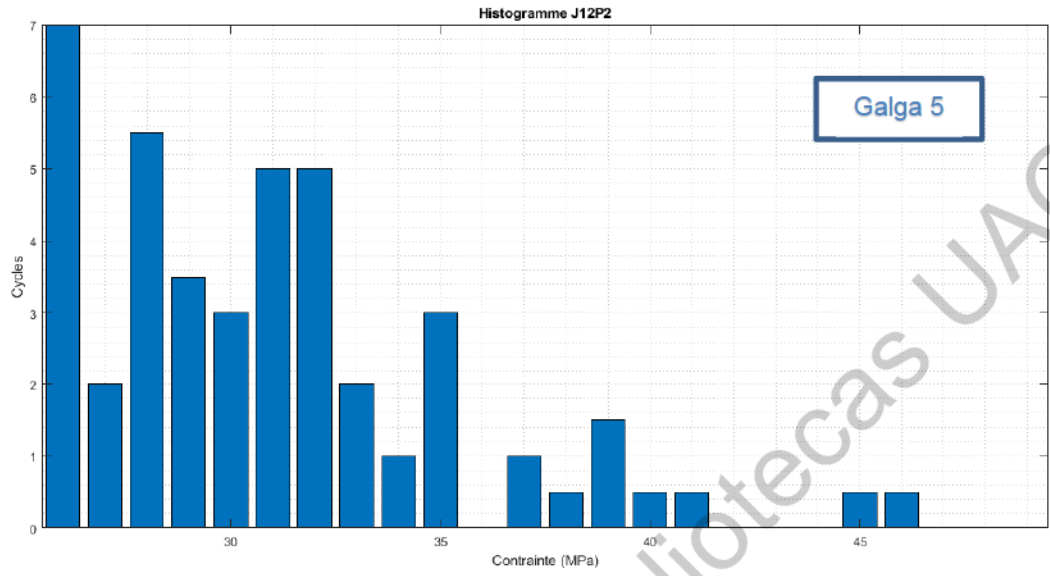


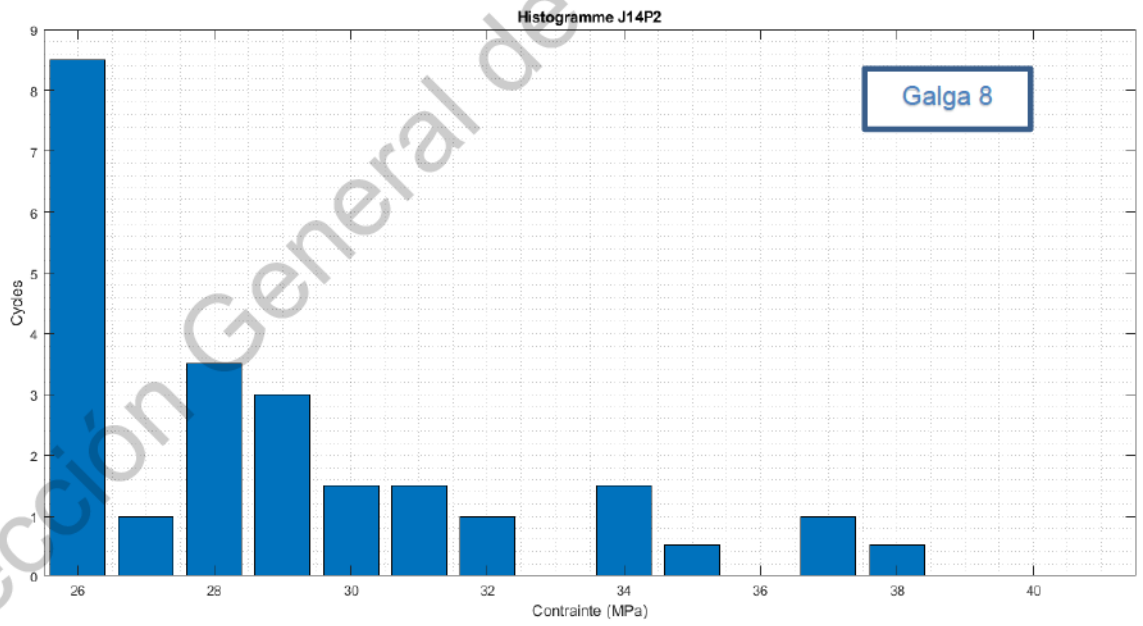
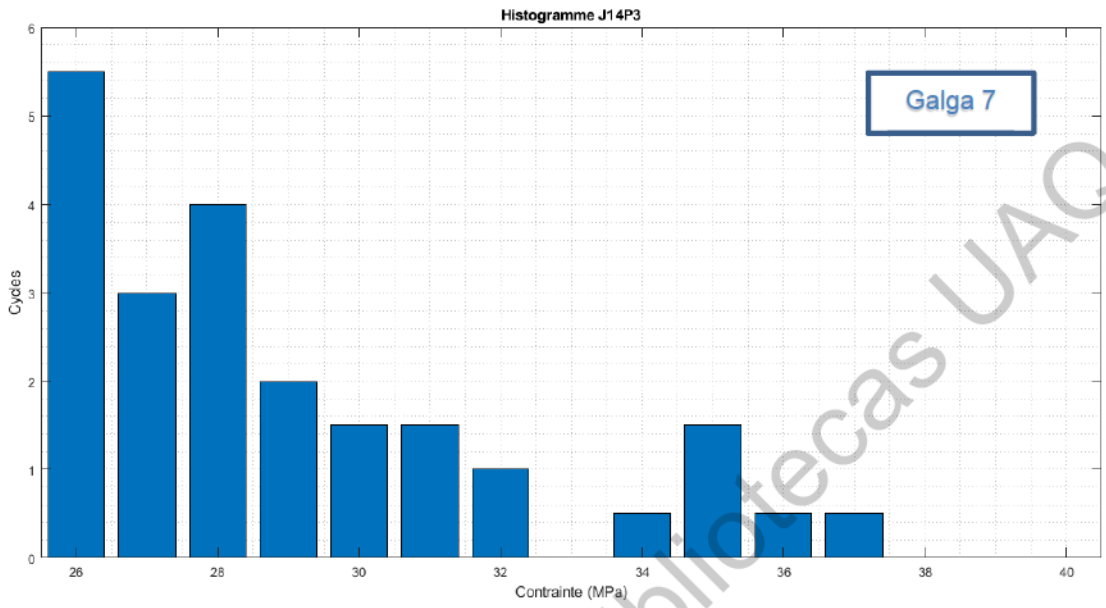


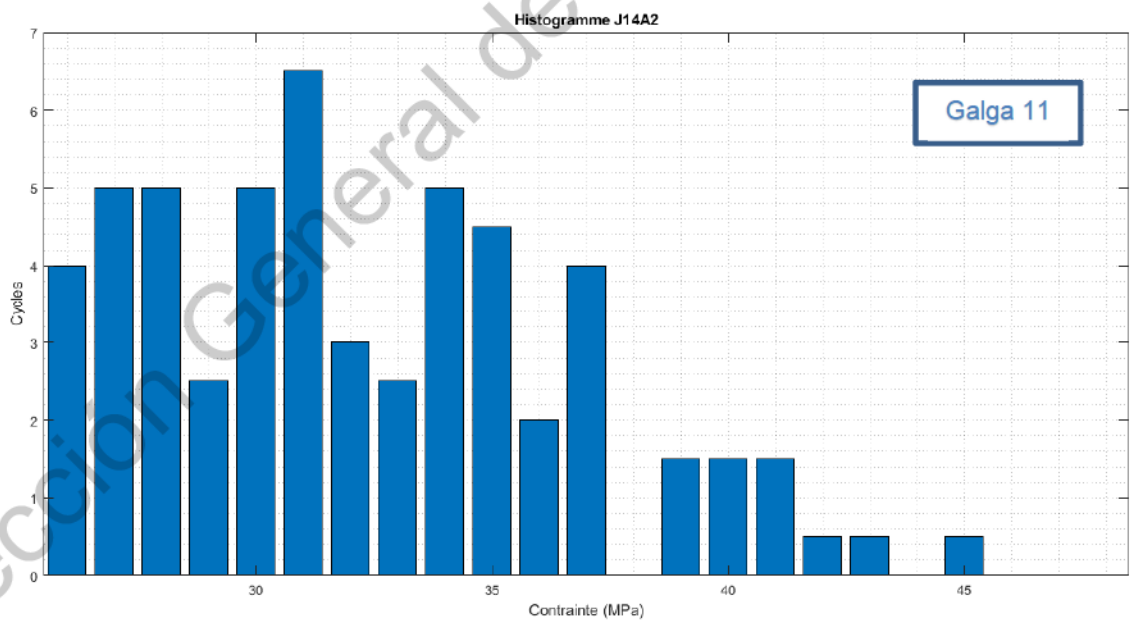
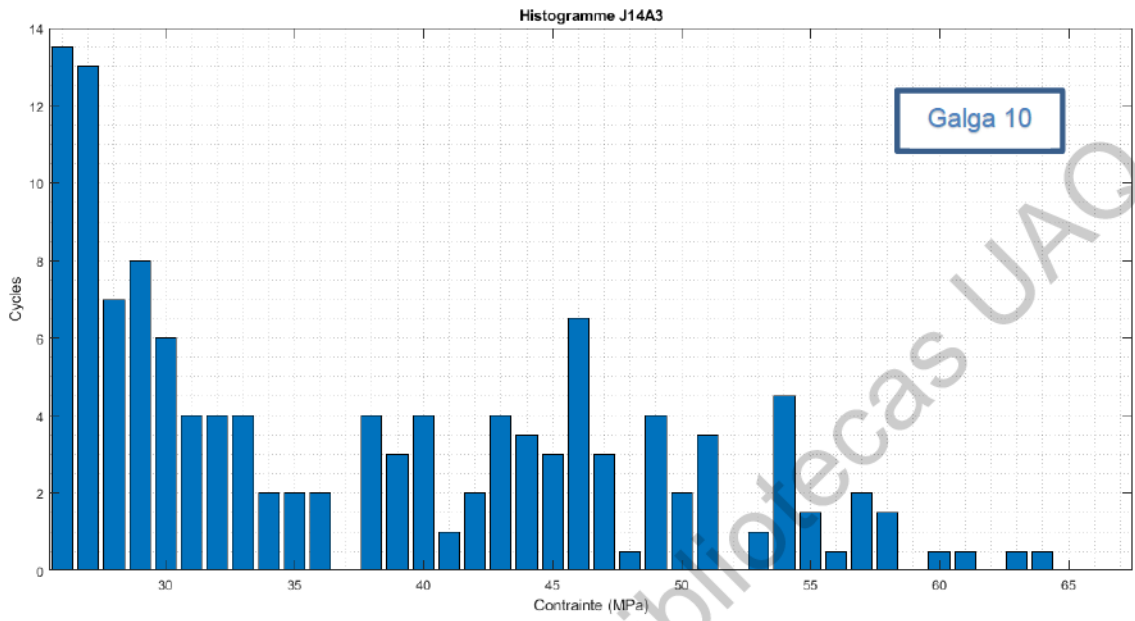
DETALLE 71











ANEXO G. Algoritmo de Análisis de Fatiga

```
#include <fstream> //files modules
#include <vector>
#include <cmath> //math module
#include <iostream> //print
#include <algorithm> //max
#include <msclr\marshal_cppstd.h>

using namespace System::Runtime::InteropServices;
using namespace std;

public class RegistroExtensometro
{
private:
vector<double> E, Sf, t, AMP, CCic, XX, XY, Corr, med, Ev, Nnd, PosNd;
vector<double> Sim, Simt, datos;
vector<int> lim, SimPos;
int index, LL, Lnd, cont;
double load, time, esf, L, X, YY, Ttotal, sX, sY, sXY, sXX, m, b, VU;
double sumMed, sumSf, promedioSf, promedioMed, d1, d2, dano_acumulado;
string line;

public:
RegistroExtensometro(char* filename, char* tfilename, double MPa)
{
ifstream input_file(filename);
ifstream input_tfile(tfilename);

while (input_tfile >> time)
t.push_back(time);
while (input_file >> esf)
{
datos.push_back(esf);
Sf.push_back(esf * MPa);
}
Ttotal = (t.back() - 1) / 86400;
L = Sf.size(); //L = length(Sf);

double jump = L / 300;
for (int i = 0; i <= 300; i++)
lim.push_back(round(jump * i));

sX = 0, sY = 0, sXY = 0, sXX = 0, m = 0, b = 0;
sumMed = 0, sumSf = 0, cont = 0, promedioSf = 0, promedioMed = 0;
}

void corregirTemperatura()
{
for (int i = 0; i < lim.size() - 1; i++)//for i = 1:length(lim) - 1
{
//med = lim(i) + 1 : lim(i + 1);
for (int j = lim.at(i) + 1; j <= lim.at(i + 1); j++)
{
med.push_back(j);
//XX = med. ^ 2;
XX.push_back(pow(j, 2));
}

index = 0;
//cout << lim.at(i) + 1 << " - " << lim.at(i + 1) << endl;
}
}
}
```



```

//cout << lim.at(i) + 1 << " - " << lim.at(i + 1) << endl;
for (int j = lim.at(i); j < lim.at(i + 1); j++)
{
    //XY = med'.*Sf(lim(i)+1:lim(i+1));
    XY.push_back(med.at(index) * Sf.at(j));
    //sX = sum(med);
    sX += med.at(index);
    //sY = sum(Sf(lim(i) + 1:lim(i + 1)));
    sY += Sf.at(j);
    index++;
}

LL = med.size();

//sXX = sum(XX);
for (int j = 0; j < XX.size(); j++)
    sXX += XX.at(j);

//sXY = sum(XY);
for (int j = 0; j < XY.size(); j++)
    sXY += XY.at(j);

//m = (sXY - (sX * sY / LL)) / (sXX - ((sX) ^ 2) / LL);
m = (sXY - ((sX * sY) / LL)) / (sXX - (pow(sX, 2) / LL));

//b = mean(Sf(lim(i) + 1:lim(i + 1))) - m * mean(med);
cont = 0, index = 0;
sumMed = 0;
sumSf = 0;
promedioMed = 0;
promedioSf = 0;
for (int j = lim.at(i); j < lim.at(i + 1); j++)
{
    sumSf += Sf.at(j);
    sumMed += med.at(index);
    cont++;
    index++;
}
promedioSf = sumSf / cont;
promedioMed = sumMed / med.size();
b = promedioSf - m * (promedioMed);

//Ev = m * med + b;
//index = 0;
//for (int j = lim.at(i); j < lim.at(i + 1); j++)
for (int j = 0; j < med.size(); j++)
{
    Ev.push_back(m * med.at(j) + b);
    //index++;
}

//Corr(lim(i) + 1:lim(i + 1)) = Sf(lim(i) + 1:lim(i + 1)) - Ev';
index = 0;
for (int j = lim.at(i); j < lim.at(i + 1); j++)
{
    Corr.push_back(Sf.at(j) - Ev.at(index));
    index++;
}

//printf("LL:%d\nsX:%lf\nsY : %lf\nsXY : %lf\nsXX : %lf\nm : %lf\nb : %lf\n\n",LL, sX, sY, sXY, sXX, m, b);
//clear med XX XY sX sY sXY sXX m b Ev LL

```

```

med.clear();
XX.clear();
XY.clear();
Ev.clear();
sX = 0;
sY = 0;
sXY = 0;
sXX = 0;
m = 0;
b = 0;
LL = 0;
} //end
}

void picosValles()
{
    d1 = 0, d2 = 0;
    cont = 0;

    if (Corr.size() < t.size())
        Corr.push_back(0);

    for (int i = 0; i < Corr.size(); i++)
        Nnd.push_back(Corr.at(i));
    Lnd = Nnd.size();
    for (int i = 1; i <= Lnd; i++)
        PosNd.push_back(i);
    Sim.push_back(Nnd.at(0));
    SimPos.push_back(1);
    Simt.push_back(0);

    for (int i = 0; i < Lnd - 2; i++)
    {
        d1 = (Nnd.at(i + 1) - Nnd.at(i)) / abs(Nnd.at(i + 1) - Nnd.at(i));
        d2 = (Nnd.at(i + 2) - Nnd.at(i + 1)) / abs(Nnd.at(i + 2) - Nnd.at(i + 1));
        if (d1 != d2)
        {
            if (d1 != 0 && d2 != 0)
            {
                cont++;
                Sim.push_back(Nnd.at(i + 1)); //Picos y Valles
                SimPos.push_back(i + 1); //Posición picos y valles
                Simt.push_back(t.at(SimPos.at(cont))); //Tiempo picos y valles
            }
        }
    }
}

void conteoCiclos()
{
    int i = 1;
    //while (input_file >> load)
    for(int j = 0; j<datos.size();j++)
    {
        E.push_back(datos.at(j));
        L = E.size();

        while (L > 3 && i < L - 1)
        {
            X = abs(E[i + 1] - E[i]);

```

```

YY = abs(E[i] - E[i - 1]);
if (X > YY)
    if (i == 0 || i - 1 == 0)
    {
        AMP.push_back(E[i] - E[i - 1]);
        CCic.push_back(0.5);
        E.erase(E.begin() + i - 1); //deletes entry
        L--;
    }
    else
    {
        AMP.push_back(E[i] - E[i - 1]);
        CCic.push_back(1);
        E.erase(E.begin() + i - 1); //deletes entry
        E.erase(E.begin() + i - 1); //deletes entry
        L -= 2;
        i -= 2;
        if (i < 1)
            i = 1;
    }
else if (X == YY)
    if (i == 0 || i - 1 == 0)
    {
        i++;
        if (i == L - 1)
            if (E.size() == 2)
                L = 0;
            else
            {
                AMP.push_back(E[i] - E[i - 1]);
                CCic.push_back(0.5);
                E.erase(E.begin() + i - 1); //deletes entry
                E.erase(E.begin() + i - 1); //deletes entry
                L -= 2;
                i--;
            }
    }
    else
    {
        AMP.push_back(E[i] - E[i - 1]);
        CCic.push_back(1);
        E.erase(E.begin() + i - 1); //deletes entry
        E.erase(E.begin() + i - 1); //deletes entry
        L -= 2;
        i--;
    }
    else
        i++;
}
}

if (E.size() > 1)
    for (int k = 1; k < E.size(); k++)
    {
        AMP.push_back(E[k] - E[k - 1]);
        CCic.push_back(0.5);
    }

for (int k = 0; k < AMP.size(); k++)

```

```

    AMP[k] = abs(AMP[k]);

cout << "AMP size: " << AMP.size() << endl;

vector<int> RAMP(AMP.size());
for (int k = 0; k < AMP.size(); k++)
    RAMP[k] = round(AMP[k]);

int Icat = 1;
int max_amp = ceil(*max_element(AMP.begin(), AMP.end()));
vector<int> Cat;
for (int k = 1; k <= max_amp; k++)
    Cat.push_back(k);

vector<double> Fr(Cat.size(), 0);
double det = 71;
double tronc = det * pow(2. / 5., 1. / 3.);
for (int k = 0; k < RAMP.size(); k++)
    if (RAMP[k] > Icat)
        Fr[RAMP[k] - Icat] += CCic[k];

ofstream output_file("fatigue_cycles.csv", ofstream::trunc);
//writing in external file - no figures in c, forced to plot in py for example
for (int i = 0; i < Cat.size(); i++)
    output_file << Cat[i] << "," << Fr[i] << std::endl;
output_file.close();

vector<double> D(Cat.size());
for (int i = 0; i < Cat.size(); i++)
    if (Cat[i] > tronc)
        D[i] = 0.5 * pow(Cat[i] / det, 3) * pow(10., -6) * Fr[i];
    else if (Cat[i] > tronc * pow(1. / 20., 1. / 5.))
        D[i] = 0.5 * pow(Cat[i] / det, 3) * pow(10., -6) * Fr[i] * pow(2.5, 2. / 3.);
    else
        D[i] = 0;

for (int k = 0; k < D.size(); k++)
    dano_acumulado += D[k];
}

void vidaUtil()
{
    double F = 365 / Ttotal;
    VU = dano_acumulado * F;
}

double getDanoAcumulado()
{
    return dano_acumulado;
}

double getTiempoTotal()
{
    return Ttotal;
}

double getVidaUtil()
{
    return VU;
}
};

```