

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO  
USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Monitoreo de puentes en regiones andinas remotas**

**Christian David Ruilova Zambrano  
Diana Lizeth Ruilova Zambrano**

**Ingeniería Civil**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Civil

Quito, 11 de mayo de 2020

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO  
USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Monitoreo de puentes en regiones andinas remotas**

**Christian David Ruilova Zambrano  
Diana Lizeth Ruilova Zambrano**

**Nombre del profesor, Título académico**      Eva Lantsoght, PhD in Structural Engineering

Quito, 11 de mayo de 2020

## **DERECHOS DE AUTOR**

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Christian David Ruilova Zambrano

Código: 00114036

Cédula de identidad: 1724347719

Nombres y apellidos: Diana Lizeth Ruilova Zambrano

Código: 00114031

Cédula de identidad: 1724077043

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2020

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

## RESUMEN

Los puentes son estructuras muy importantes para una ciudad, por su elevado costo y porque unen puntos importantes de la misma, por esto es esencial que estas estructuras se encuentren en perfecto estado y que sean seguras para las personas que transitan diariamente por el puente, el MONITOREO ESTRUCTURAL es de vital importancia en el cuidado de la salud de las estructuras ya que nos brinda información oportuna para poder dar mantenimiento eficaz y evitar problemas que pueden surgir por el paso del tiempo y eventos naturales que pueden afectar un puente.

Hay muchos factores que se deben considerar al utilizar cada tipo de sensor, tales como la temperatura, el costo, la distancia que estos van a cubrir. Es importante que se ocupen los sensores indicados para cada estudio y que se tomen todas las consideraciones para su correcta instalación y análisis de datos.

El MONITOREO ESTRUCTURAL es una gran herramienta que debe ser utilizada de forma más habitual, si conocemos sus beneficios y la gran precisión que esta posee podemos evitar danos no deseados en las estructuras y hasta evitar que se llegue a colapso en el peor de los casos, existen muchos tipos de tecnologías que se utilizan en un monitoreo como acelerómetros, inclinómetros, sensores de deformación, sensores de desplazamiento, estos nos dan información muy valiosa que si la utilizamos correctamente nos permitirá crear registros históricos para conocer el comportamiento de las estructuras frente a diversos factores que no podemos controlar. En este estudio se utilizaron los sensores de fibra óptica basados en la red de Bragg estos nos proporcionan grandes beneficios tanto en durabilidad como en precisión lo cual es muy importante ya que buscamos minimizar los errores al realizar un monitoreo en un puente por ser estructuras de tan alta prioridad, los cuales son usados día a día por miles de personas.

Palabras clave: Monitoreo, sensor, deformaciones, aceleraciones, temperatura, fisuras, estructuras, datos, análisis.

## ABSTRACT

Bridges are very important structures for a city, due to their high cost and because they connect important points of it, for this reason it is essential that these structures are in perfect condition and that they are safe for people who transit the bridge daily, the STRUCTURAL MONITORING is of vital importance in the health care of structures since it provides us with timely information to be able to provide effective maintenance and avoid problems that may arise from the passage of time and natural events that can affect a bridge.

There are many factors that must be considered when using each type of sensor, such as temperature, cost, and the distance they will cover. It is important that the indicated sensors are taken care of for each study and that all considerations are taken for its correct installation and data analysis.

STRUCTURAL MONITORING is a great tool that should be used on a more regular basis, if we know its benefits and the great precision that it has, we can avoid unwanted damage to the structures and even avoid collapse in the worst case, There are many types of technologies that are used in monitoring such as accelerometers, inclinometers, deformation sensors, displacement sensors, these give us very valuable information that if used correctly will allow us to create historical records to know the behavior of structures against various factors that we cannot control. In this study, the fiber optic sensors based on the Bragg network were used, these provide us with great benefits both in durability and precision, which is very important since we seek to minimize errors when performing monitoring on a bridge because they are structures of such high priority, which are used day by day by thousands of people.

Key words: Monitoring, sensor, deformations, accelerations, temperature, fissure, structures, data, analysis.

## TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	11
MONITOREO ESTRUCTURAL EN LA TOMA DE DECISIONES .....	13
TIPOS DE TECNOLOGIAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL.....	14
Acelerómetros .....	14
Emision Acustica .....	14
Sensor de Medición de Grieta.....	15
Sensor Electroquímico de Fatiga .....	15
Sensor de Propagación de Grietas basado en Desplazamientos .....	15
Inclinómetros .....	16
Instrumentos basados en láser.....	16
Sensor de Desplazamiento .....	17
Sensor de Deformación.....	17
Sensor de Fibra Óptica.....	18
Temperatura .....	18
Medidores de deformación BDI.....	19
MONITOREO CON SENSORES ELÉCTRICOS VS SENSORES DE FIBRA OPTICA .....	20
GALGAS EXTENSOMÉTRICAS .....	22
Clases de galgas extensométricas .....	25
FIBRA DE BRAGG .....	26
Deformación en una red de Bragg .....	28
SENSORES QUE SE UTILIZARÁN .....	30
FS62CSS .....	30
FS62PSS .....	31
FS62RSS .....	32
FS62WSS .....	33
COMPARACIÓN DE SENSORES .....	34
SENSOR FS62CSS .....	35
Características especiales.....	35
Tecnología de red de Fibra de Bragg.....	36
Beneficios y aplicaciones.....	36
Instalación.....	36
Referencia de medición .....	38
Temperatura .....	39
SENSOR FS62WSS .....	43
Características especiales.....	43
Beneficios y aplicaciones.....	43
Tecnología de red de Fibra de Bragg.....	43
Instalación.....	44
Referencia de medición .....	45
Soldadura .....	45
Temperatura .....	46
SENSOR FS62PSS.....	49
Características especiales.....	49
Tecnología de red de Fibra de Bragg.....	49
Beneficios y aplicaciones.....	50

Instalación .....	50
Referencia de medición .....	51
Consideraciones especiales .....	53
SENSOR FS62RSS .....	54
Características especiales .....	54
Tecnología de red de Fibra de Bragg .....	55
Beneficios y aplicaciones .....	55
Instalación .....	55
Hormigonado .....	58
Temperatura .....	58
CASO DE ESTUDIO PUENTE SOBRE EL RÍO PAPALOAPAN.....	61
Introducción .....	61
Características de la Estructura .....	61
Objetivos de Monitoreo .....	63
Sensores .....	63
Comparación entre sensores .....	64
Distribución de los sensores .....	64
Datos obtenidos por los sensores .....	66
DISCUSIÓN .....	68
CONCLUSIONES .....	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coeficientes de expansión térmica.....	25
Tabla 2: Especificaciones Técnicas sensor FS62CSS.....	30
Tabla 3: Especificaciones Técnicas sensor FS62PSS.....	31
Tabla 4: Especificaciones Técnicas sensor FS62WSS.....	32
Tabla 5: Especificaciones Técnicas sensor FS62RSS.....	33
Tabla 6: Comparación de sensores.....	34
Tabla 7: Materiales para Instalación.....	36
Tabla 8: Materiales para Instalación.....	44
Tabla 9: Materiales necesarios para la instalación.....	50
Tabla 10: Materiales para Instalación.....	55
Tabla 11: Sensores utilizados en el puente del Rio Papaloapan.....	63
Tabla 12: Comparación.....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relación entre el SM y la INSPECCION VISUAL.....	13
Figura 2: Rejilla de fibra Bragg .....	22
Figura 3: diagrama de una galga extensiométrica. ....	24
Figura 4: sensibilidad transversal de una galga extensiométrica.....	25
Figura 5: Comparación de las tecnologías de sensores ópticos.....	27
Figura 6: Principio de una red Bragg.....	28
Figura 7: Sensor FS62CSS .....	30
Figura 8: Sensor FS62PSS.....	31
Figura 9: Sensor FS62WSS .....	32
Figura 10: Sensor FS62RSS .....	33
Figura 11: Dimensiones Sensor FS62CSS .....	35
Figura 12: Lijado del material. ....	37
Figura 13: Limpieza del material. ....	37
Figura 14: Puntos de referencia. ....	38
Figura 15: Colocación de adhesivo. ....	38
Figura 16: Fijado de cables.....	39
Figura 17: Referencia para compensación de temperatura en mediciones de deformación.....	42
Figura 18: Dimensiones Sensor FS62WSS .....	43
Figura 19: Lijado de superficie.....	45
Figura 20: Puntos de referencia.....	45
Figura 21: Proceso de soldadura.....	45
Figura 22: Puntos de alivio de tensión .....	46
Figura 23: Referencia para compensación de temperatura en mediciones de deformación.....	48
Figura 24: Dimensiones sensor FS62PSS .....	49
Figura 25: Preparación del área de trabajo .....	51
Figura 26: Sensor FS62PSS.....	51
Figura 27: Marcado de líneas horizontales y verticales y limpieza del área .....	52
Figura 28: Colocación del sensor con cinta.....	52
Figura 29: Colocación del sensor con adhesivo Z10.....	53
Figura 30: Dimensiones Sensor FS62RSS .....	54
Figura 31: Protección del cable. ....	56
Figura 32: Salida directa de tubo, caja de protección.....	56
Figura 33: Caja de protección empotrada.....	57
Figura 34: Fijado del sensor. ....	57
Figura 35: Fijado del sensor. ....	57
Figura 36: Hormigonado y red de protección.....	58
Figura 37: Referencia para compensación de temperatura en mediciones de deformación.....	60
Figura 38: Sketch, elementos principales del puente y modelo de la estructura.....	62
Figura 39: Distribución Sensores en puente .....	65
Figura 40: Deformación producida por vibración ambiental .....	66
Figura 41: Gráficas de referencia de sensor derecho e izquierdo.....	67

## INTRODUCCIÓN

El MONITOREO ESTRUCTURAL es una técnica que combina la tecnología, con los conocimientos en seguridad de estructuras, para estudiar el comportamiento de las obras civiles frente al paso de los años, el clima, eventos naturales, esto se logra por medio de sensores los que pueden estar fundidos dentro de la estructura o colocados en lugares estratégicos para recolectar datos y así conocer el estado en el que se encuentran las obras civiles.

Para llevar a cabo el MONITOREO ESTRUCTURAL es necesario el uso de diversos sensores, estos pueden ser, de contacto o no, de fibra, interiores o exteriores, es por esta razón que es importante escoger el sensor que mejor se ajuste a cada necesidad, tomando en cuenta factores externos como el clima ya que estos pueden influir en los datos alterándolos de formas no deseadas.

Dependiendo del tipo de sensor, se pueden tomar diferentes datos enfocándonos en un área sea esta: deformaciones, desplazamientos, inclinaciones, rotaciones, temperatura, grietas, aceleración, para aplicar cada uno de estos sensores se requieren conocimientos técnicos y de ingeniería. Una correcta instalación y calibración de los sensores es indispensable para que esta técnica funciones correctamente, se requiere que la persona que instale los sensores esté debidamente capacitada, que tenga experiencia en trabajo de campo, que conozca tanto el software como el hardware además de los protocolos de seguridad.

Los datos pueden ser extraídos de diversas formas, por medio de recuperación manual o transmitidos mediante un modem por medio de redes inalámbricas, dependiendo también de la frecuencia en la recuperación de datos, los costos de los sistemas de monitoreo pueden variar.

Una vez que los datos han sido tomados viene lo más importante, el análisis de los datos, este proceso necesita que el encargado tenga una amplia experiencia estudiando el comportamiento de las estructuras, se puede facilitar el análisis por medio de gráficas para una mejor comprensión de los datos, o bien se pueden usar los datos para realizar simulaciones por medio de modelación con elementos finitos para obtener resultados más precisos.

El MONITOREO ESTRUCTURAL es una técnica que se encuentra en constante mejora, pero cabe resaltar que actualmente se encuentra en un punto en que puede brindar buenos resultados mostrando el gran potencial que esta técnica tiene para la evaluación de estructuras.

Las aplicaciones más comunes para las técnicas de MONITOREO ESTRUCTURAL son:

- Monitoreo de una estructura mientras esta se encuentra afectada por eventos extremos.
- Evaluación de daños en estructuras.
- Verificar si los trabajos de refuerzo, reparación o rehabilitación fueron eficientes.
- Identificar los problemas en una estructura.
- Evaluar las condiciones de falla por fatiga.

El MONITOREO ESTRUCTURAL (SM) es una gran herramienta ya que la podemos combinar con otras tácticas como la INSPECCION VISUAL. Estas 2 técnicas tienen una buena sinergia y pueden completarse una a la otra, para analizar esto dividiremos los resultados en: resultados temporales y espaciales.

- Resultados Temporales: Los resultados temporales son la cantidad de datos que se pueden obtener en un periodo específico de tiempo o la Frecuencia de la toma de los datos.
- Resultados Espaciales: Los resultados espaciales son la cantidad de lugares en los que vamos a capturar los datos o el número de sensores usados en el análisis.

Al comparar estos 2 tipos de resultados podemos ver que el MONITOREO ESTRUCTURAL posee buenos resultados temporales, pero tiene pocos resultados espaciales, ya que este normalmente se utilizan sensores de punto lo que nos da una lectura específica de un solo lugar, pero se pueden tomar muchos datos en un periodo de tiempo determinado. Por el contrario, la INSPECCION VISUAL tiene unos buenos resultados espaciales, pero bajos resultados temporales como se muestra en la figura 1.

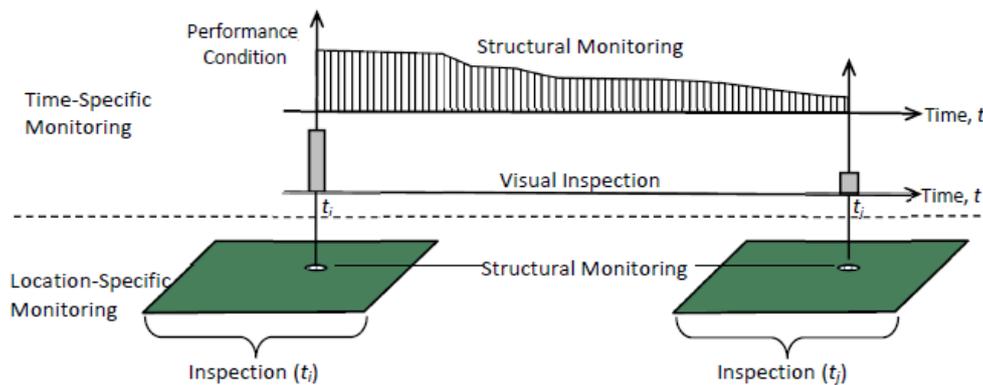


Figura 1: Relación entre el SM y la INSPECCION VISUAL

Cabe destacar que la INSPECCIÓN VISUAL cuenta con algunas limitaciones que son las siguientes:

- Identificar problemas estructurales que no son visibles.
- Identificar cambios pequeños en la estructura.
- Determinar la demanda operativa y su variabilidad en un periodo de tiempo.

### **MONITOREO ESTRUCTURAL EN LA TOMA DE DECISIONES**

El MONITOREO ESTRUCTURAL no pretende reemplazar a las otras técnicas existentes sino ser otra herramienta eficaz cuando el resto de las técnicas no pueden proveer la información necesaria para la tomar decisiones sobre una estructura, el MONITOREO ESTRUCTURAL nos puede brindar información acerca de los problemas rendimiento de la estructura, el cambio o la progresión de estos problemas a lo largo del tiempo, así como el impacto de estos en la seguridad.

Toda la información que nos provee el MONITOREO ESTRUCTURAL nos sirve para poder tomar decisiones objetivas y oportunas para precautelar la seguridad y funcionalidad de las estructuras, así como la de los usuarios. Una pronta intervención sea esta de reparación, sustitución o modernización puede ser llevada a cabo de una forma más eficiente y económica si se cuenta con toda la información necesaria para una mejor comprensión de la situación en la que se encuentra la estructura.

## **TIPOS DE TECNOLOGIAS DE MONITOREO ESTRUCTURAL**

Existen muchos tipos de sensores que podemos utilizar en el MONITOREO ESTRUCTURAL y cada sensor debe ser utilizado correctamente en sus respectivas áreas por lo que a continuación presentaremos una breve explicación de cada tipo de sensor además de sus ventajas y desventajas.

### **Acelerómetros**

Los sensores de tipo acelerómetro son dispositivos de detección que se unen a una superficie la cual va a sufrir cambios en su velocidad, con estos sensores se obtiene una señal que es proporcional a la tasa de movimiento de la masa con respecto al tiempo, esta información se puede utilizar para medir las vibraciones de la estructura.

#### **Ventajas**

- Fácil instalación.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Se pueden reutilizar.

#### **Desventajas**

- Produce una gran cantidad de datos.
- Difícil y costoso reducir la cantidad de datos, esto dificulta el análisis y obtención de resultados.

### **Emisión Acústica**

Los sensores basados en emisiones acústicas (AE), detectan las ondas elásticas generadas por la liberación de energía, tales como fatiga, fractura o deformaciones plásticas. Cuando un material cambia rápidamente su distribución de carga, se crean ondas sonoras conocidas como ondas AE, esto se genera cuando un material es sometido a un estrés.

#### **Ventajas**

- Posee una larga trayectoria en el mercado.
- Se puede usar en estructuras de acero.
- Esta técnica se encuentra bien implementada.
- Cuenta con varios proveedores.

#### **Desventajas**

- Según la literatura solo se captura de un 75% a 80% de las ondas AE.
- Se puede necesitar un sistema secundario.
- Necesita ciertas condiciones para que este método pueda funcionar, por esta razón se necesita un estudio previo para ver si la señal puede transmitirse.
- El análisis AE requiere mucho conocimiento y experiencia.

### **Sensor de Medición de Grieta**

Un sensor de medición de grieta sirve para detectar el inicio, el crecimiento o la presencia de grietas existentes en estructuras de hormigón o de acero.

#### **Sensor Electroquímico de Fatiga**

El Sensor Electroquímico de Fatiga se encuentra compuesto por un electrodo, un contraelectrodo y un electrodo de referencia, estos componentes se encuentran en contacto con un líquido electrolítico, cuando el gas traspasa la membrana de teflón este pasa hasta los electrodos lo que genera una corriente eléctrica que es proporcional a la concentración del gas, el sensor amplifica la corriente y la clasifica según la calibración previa del sensor.

#### **Ventajas**

- Detecta las grietas antes de estas se vuelvan visibles.

#### **Desventajas**

- La ubicación del sensor es crucial para poder captar el inicio y la propagación de las grietas.

#### **Sensor de Propagación de Grietas basado en Desplazamiento**

Un sensor de propagación de grietas basados en desplazamiento captura los cambios en las tensiones eléctricas que se producen cuando hay desplazamientos, cualquier cambio en el ancho de las grietas, así como su propagación es captado por este tipo de sensores.

#### **Ventajas**

- Se puede usar con otros sensores.
- Puede ser automática o manual la recolección de datos.

#### **Desventajas**

- El tamaño de los sensores puede dificultar su uso en esquinas o superficies irregulares, no se los puede utilizar en espacios reducidos.

### **Inclinómetros**

Los inclinómetros son dispositivos que sirven para detectar cambios en los ejes de orientación de una estructura, también se utilizan para conocer la rotación que puede tener un elemento.

#### **Ventajas**

- La señal que entrega es fácil de capturar y analizar.
- Los sensores son económicos.
- Se los puede usar en conjunto con el MONITOREO ESTRUCTURAL.

#### **Desventajas**

- Si se utiliza solo no proporciona suficiente información.

### **Instrumentos basados en láser**

Instrumentos basados en laser sirven para medir los desplazamientos estructurales, su configuración es rápida y se puede usar para medir deflexiones en vigas de puentes.

#### **Ventajas**

- Existen gran cantidad de proveedores.
- Se pueden configurar rápidamente.

#### **Desventajas**

- El equipo es costoso.
- Por sí solos no son lo suficientemente precisos para detectar problemas estructurales.
- Requiere que el lente sea limpiado periódicamente para que el polvo no afecte las lecturas.

## **Sensores de Desplazamiento**

Un sensor de desplazamiento normalmente se encuentra construido con un transductor lineal diferencial variable en una cascara metálica hueca, este eje se mueve libremente con lo que se logra medir deflexiones relativas o desplazamientos.

### **Ventajas**

- Es altamente preciso.

### **Desventajas**

- Usa una escala limitada (Pulgadas).
- Necesita un punto de referencia fija, si el punto de referencia se mueve, los datos capturados pueden verse afectados.

## **Sensor de Deformación**

Un sensor de deformación mide la relación entre alargamiento y contracción de un material, causada por una fuerza de compresión o tracción aplicada en una superficie.

### **Ventajas**

- Las mediciones son precisas.
- La señal de salida de los sensores es fácil de entender y analizar.
- Existen muchos proveedores de estos sensores.
- Esta técnica se encuentra bien implementada.

### **Desventajas**

- Puede volverse muy costos si hay gran cantidad de datos.
- Se requiere calibración periódica.
- Cambios climáticos afectan los datos capturados.

## **Sensores de Fibra Óptica**

Los sensores de fibra óptica son aquellos sensores que se encuentran constituidos por fibras de polímeros especializados, estos sensores son muy versátiles y se los usa sobre todo para captura de datos de tensiones y temperatura.

Debido a la alta pureza de las fibras ópticas, existe un incremento en el uso de instrumentos de fibra en la detección de deformaciones ya que estas cuentan con una mínima pérdida de señal a través de largas distancias ( $<0.2\text{dB/Km}$ ).

### **Ventajas**

- Precisión de 1 micrómetro o menos.
- Menos costosos de instalar en grandes longitudes cuando se los instala en serie.
- Eficaz en captura de datos de alta frecuencia.

### **Desventajas**

- Son más costosos que los sensores estándar y los sistemas de adquisición de datos.
- Puede tener algunos costos adicionales.
- Si no se necesita una precisión extrema los costos no se justifican.

## **Temperatura**

Existen 2 tipos principales de sensores de temperatura los termistores y los termopares. Los termopares están compuestos de dos materiales diferentes que producen un voltaje proporcional a la temperatura y los termistores usan un resistor sensible a la temperatura.

### **Ventajas**

- Se puede utilizar para relacionar el cambio de los datos capturados con los cambios de temperatura.
- Los sensores son Económicos.
- Alta Precisión.

### **Desventajas**

- Los sensores deben ser protegidos de la radiación solar directa.
- Si no se ubica correctamente los sensores se pueden alterar los datos capturados.

### **Medidores de deformación BDI**

Este es un medidor de deformaciones que se emplea para el monitoreo estructural, cuya principal función es registrar los esfuerzos dinámicos, principalmente en puentes y elementos estructurales, este tipo de sensores fueron diseñados para el registro de deformaciones provocadas por cargas vivas, por este motivo los cambios producidos por temperatura no suelen ser considerados en las mediciones a corto plazo.

Puesto que este tipo de sensores se colocan en la estructura registran la misma deformación que sienten los elementos, en caso de presentarse un cambio en la temperatura se registran los esfuerzos causados por la compresión por que los sensores son anclados en el sistema en el cual se quiere registrar la medición. (BDI)

### **Ventajas**

- Registran deformaciones por carga viva.
- Son ideales para mediciones estructurales en puentes.
- Poseen mayor resistencia en ambientes extremos.
- Son altamente resistentes al agua.
- Pueden ser aplicados en estructuras de acero y hormigón.
- Han sido diseñados para una larga vida útil y poco mantenimiento.

### **Desventajas**

- Para mediciones que se realizan durante largos periodos de tiempo se requiere colocar el sensor en 0 de manera periódica debido a los cambios de temperatura.
- Por ser sensores extremadamente sensibles se debe tener cuidado al momento de la instalación y manipulación, por lo que se susceptibles a dañarse.

## **MONITOREO CON SENSORES ELECTRICOS VS SENSORES DE FIBRA OPTICA**

Diversos factores influyen en el deterioro de una estructura, una mala construcción, actividad sísmica, desgaste por el paso del tiempo, construcciones cercanas, pérdidas en materiales, afectan significativamente a las estructuras, por ello se ha realizado a lo largo de los años monitoreos periódicos a estructuras utilizando sensores eléctricos para monitorear cambios estructurales, dichos elementos en ocasiones carecen de durabilidad y resistencia lo cual dificulta una recopilación de datos precisos y procesables.

Otra alternativa a los sensores convencionales, son los sensores de fibra óptica, los mismos se basan en rejillas de fibra Bragg, que consiste en un arreglo de placas que poseen dos índices de refracción, por tratarse de una microestructura consta de unos cuantos centímetros de largo, proveniente de la modificación de la fibra empleada en las telecomunicaciones, los sensores de fibra óptica cuentan con germanio, un elemento químico conocido por su capacidad conductora junto con un láser UV. Esta configuración permite una variación periódica en el índice de refracción de la fibra óptica, cuando la luz viaja a lo largo de la fibra, la rejilla de Bragg refleja un rango muy estrecho de longitudes de onda, las demás longitudes de onda se transmiten a través de la rejilla. El centro de esta banda de longitudes de onda reflejadas se conoce como la longitud de onda de Bragg.

Bajo esfuerzos el periodo de la fibra Bragg incrementa debido al estiramiento físico o a la compresión, esto produce un cambio en la longitud de onda de Bragg dato que se registra en interrogador, el sistema para la recopilación de datos.

Las fibras de Bragg también son sensibles a la temperatura, lo que permite la utilización de los sensores de fibra óptica basados en este tipo de elementos como monitores de temperatura para medir los efectos que la misma puede tener sobre la estructura, este tipo de sensores puede ser empleados para el monitoreo de diferentes fenómenos como aceleración, presión inclinación etc.

Después de la implementación de sistemas de monitoreo con sensores de fibra óptica se han podido evidenciar mejorías en la recopilación de datos y duración de los mismos, frente a los sensores eléctricos convencionales, se ha podido comprobar que los sensores de fibra óptica proveen señales más estables y duraderas inclusive en altos niveles de vibración como sucede en estructuras como puentes y carreteras, este tipo de sensores no presentan fallas mecánicas, la longitud del cable y su distancia no influyen en la precisión

de los resultados, esto se debe a que este tipo de sensores presentan una mínima atenuación en la señal lo que permite que los datos sean fiables aún si el sistema de recolección de datos se encuentre a kilómetros de distancia, los sensores de fibra óptica son mucho más delgados y livianos frente a los tradicionales conductores de cobre lo que facilita la conexión, esta propiedad permite realizar varias conexiones con diferentes sensores con distintas longitudes de onda, reduciendo así los requerimientos en el cableado necesarios para realizar los procedimientos de monitoreo, y disminuyendo significativamente el impacto que este tipo de procedimientos puede generar en una estructura, adicionalmente los sensores de fibra óptica no se ven afectados por el electromagnetismo y la radio frecuencia, esta propiedad los convierte en instrumentos adecuados para realizar mediciones en puentes ferroviarios, túneles para trenes eléctricos, los mismos que pueden producir fuertes campos electromagnéticos.

Los sensores de fibra óptica pueden ser utilizados en ambientes de difícil monitoreo y colocados en espacios pequeños, debido a su reducido tamaño, también poseen una alta resistencia al agua y a la humedad lo que facilita su colocación en ambientes con cambios bruscos de temperatura, ambientes salinos y presiones altas, que pueden ser superiores a los 400 bar, también son aptos para ser utilizados en atmósferas potencialmente explosivas y zonas de alto voltaje.

A diferencia de los medidores de deformación de lámina metálica los sensores FBG se referencian independientemente del sistema de interrogación/ adquisición, por el contrario, se basan en un parámetro absoluto, la longitud de onda de Bragg, independiente de la potencia y los cambios solo cuando se aplica tensión o un cambio de temperatura.

El interrogador óptico en sí mide los valores generados por los sensores, también poseen una referencia incorporada parecida a una regla, que sirve para determinar con mayor precisión los valores de longitud de onda recibidos, dicha referencia interna permite calibrar el interrogador con la medición realizada.

Para los ingenieros estructurales los sistemas de monitoreo de estructuras con sensores de fibra óptica mediciones que se permiten el estudio del comportamiento en el estado de fatiga de los materiales puesto que las láminas de fibra de carbono por ejemplo presentan mayores límites de fatiga y deformación que los materiales estructurales tradicionales, la madera, acero y hormigón son modificados cada vez más para optimizar su

comportamiento a la fatiga, por lo que exigen sistemas de monitoreo diseñados con límites de fatigas más altos.

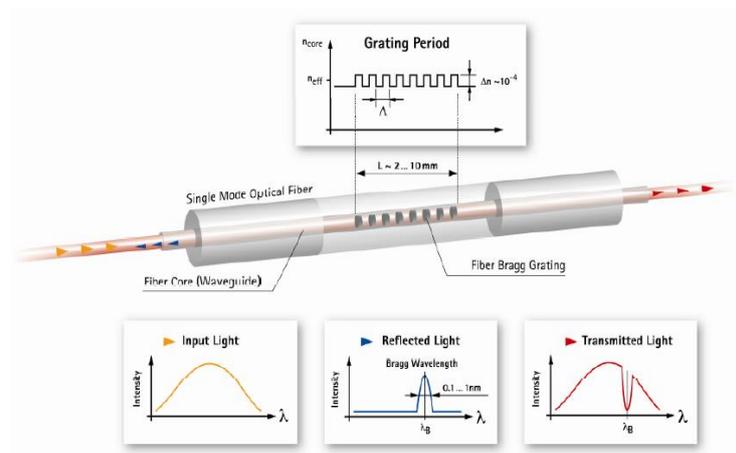


Figura 2: Rejilla de fibra Bragg

## GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

Las galgas extensométricas son sensores que permiten realizar lecturas de deformaciones bajo las superficies en las que se encuentren, estos instrumentos fueron creados por los ingenieros Arthur C y Edward Simmons en 1938.

Las primeras galgas en ser desarrolladas fueron conocidas como bonded foil, las cuales fueron realizadas con cables metálicos y confinadas con papel metálico, este tipo de galgas consta de una resistencia, es decir una red de filamentos de alambre cuyo espesor es de aproximadamente 0.025 milímetros que se une a la superficie de la galga por una capa fina de epóxico, para su correcto funcionamiento el agente adhesivo y la lámina deben transmitir conjuntamente la presión.

Las deformaciones son medidas por medio del esfuerzo que deforma la galga el mismo que produce una variación en la resistencia eléctrica del sistema, dicha variación puede deberse por el cambio de longitud, cambio de la resistividad, cambio en la sección transversal o una combinación de todos los factores.

El adhesivo que se emplea en la colocación de las galgas extensométricas también puede funcionar como aislante eléctrico entre la superficie de la lámina y la rejilla, por este

motivo se debe considerar al momento de elegir el sensor para la medición debe ser estable, capaz de medir la presión y sensibilidad a la temperatura.

Las galgas extensométricas principalmente miden las deformaciones causadas en un elemento por tracción y compresión, las alteraciones que se generan en los elementos son producidos por fuerzas externas, tales como calor, momentos, presiones, cambios estructurales y en los materiales, los valores registrados en la superficie son almacenados para su posterior análisis.

La siguiente expresión describe a las galgas extensométricas, en donde  $k$  es el factor de proporción entre la deformación mecánica y la variación relativa de resistencia del sensor

$$\frac{dR}{R} = K \frac{dl}{l} = K\varepsilon$$

Las galgas extensométricas la ser láminas rectangulares principalmente poseen una longitud neta sin los bucles finales, también conocidos como los puentes transversales, debido a estas características se puede realizar un acortamiento de las medidas totales de las galgas al ser colocadas en los elementos, recortando la lámina perpendicular a la rejilla de medición, dicha reducción puede influir en la forma en la que se aplica la deformación, lo que cambia las propiedades esenciales del calibrador de deformación, por este motivo si se busca realizar una reducción en las dimensiones de la galga extensométrica se debe mantener una distancia mínima de 1 milímetro entre el extremo de la rejilla de medición y el extremo de la lámina portadora. (HBM)

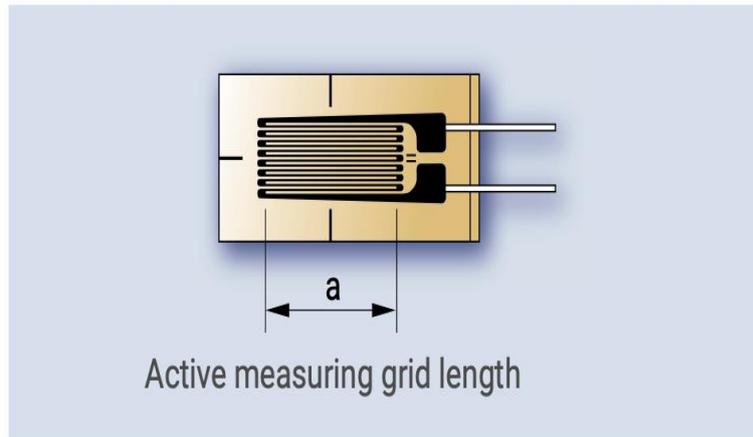


Figura 3: diagrama de una galga extensiométrica.

En las galgas extensométricas se puede presentar tensión de excitación eléctrica, dicha excitación se refiere a la caída de voltaje en el medidor de deformación indicado, un medidor de tensión puede ser definido como una resistencia que convierte energía eléctrica en calor, cabe recalcar que el caso estático la temperatura del punto de medición aumenta hasta la producción y la disipación de calor están en equilibrio térmico, para lograr un precisa y estable, en las galgas, extensométricas el aumento del punto de medición no supera los 5 grados centígrados, el cálculo supone la disipación de calor directamente de calor debajo de la superficie de las galgas extensométricas, considerando la conductancia del calor y los materiales con los que ha sido ensamblado la galga extensométrica. (HMB)

Si se llega a extender el voltaje dentro de la medición este no presentará mayor inconveniente puesto que la galga extensométrica puede soportar altos voltajes, llegando hasta cientos de voltios sin verse afectada.

El cálculo supone la disipación de calor directamente debajo de la superficie de la galga extensométricas, considerando la conductancia de los materiales en los que la galga ha sido implementada, para considerar los efectos que pueden producir en las mediciones una mala conductancia en los materiales se establecen factores de corrección para los cálculos y análisis.

Para las galgas la temperatura referencial es la temperatura ambiente, es decir 23 grados centígrados.

Una característica especial de las galgas extensométricas es su sensibilidad transversal, la misma que se define como la relación entre la sensibilidad de la galga a la dirección de la rejilla de medición, dicha propiedad se indica en cada unidad.

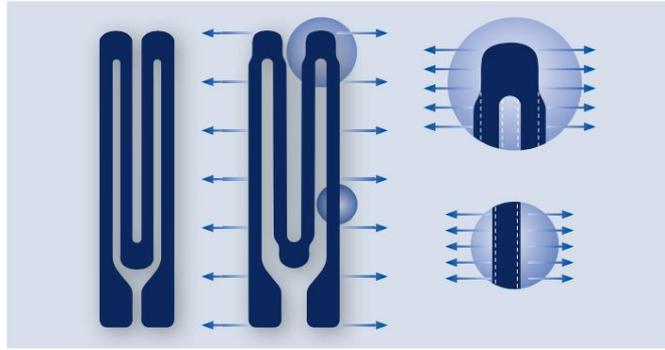


Figura 4: sensibilidad transversal de una galga extensiométrica

Cuando las galgas extensométricas se conectan de manera individual, estas muestran una señal de salida si la temperatura cambia, a dicha señal se la denomina salida térmica o tensión aparente, la misma que es independiente de la carga mecánica que haya sido empleada en el objeto de medición.

Para mitigar este efecto en las mediciones futuras se puede ajustar la galga extensiométrica al coeficiente de expansión térmica de un material en específico, para que la señal sea muy pequeña cuando la temperatura cambia, para beneficio de la respuesta en temperatura se debe emplear medidores de deformación de acuerdo con el coeficiente de expansión térmica del material de prueba, por lo que existen diferentes tipos de galgas extensométricas para cada tipo de material.

Los coeficientes de expansión térmica según el tipo de material se detallan en la tabla

Tabla 1: Coeficientes de expansión térmica

1	Hormigón	$10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
2	Acero	$12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
3	Aluminio	$23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
4	PVC	$80 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
5	Madera	$35 \text{ a } 55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
6	PMMA	$80 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

#### Clases de galgas extensométricas:

Dado que las galgas extensométricas son instrumentos para determinar la deformación existen diferentes clases de galgas.

- **Galgas lineales:** se emplean para determinar deformaciones que se encuentran en un solo plano.
- **Galgas extensométricas de cizalladura:** poseen rejillas para la medición, con propiedades especiales que permiten el registro de tensiones producidas por deformaciones laterales producto de una fuerza externa.
- **Rosetas de galgas extensométricas de lámina:** este tipo de galgas poseen 2 rejillas para la medición de tensiones biaxiales.
- **Galgas extensométricas dobles:** poseen rejillas paralelas, las mismas que permiten la medición de tensiones perpendiculares en vigas sometidas a flexión.
- **Galgas extensométricas de puente complejo:** este tipo de galgas poseen 4 rejillas, permiten realizar mediciones confiables de tensiones por deformaciones laterales en elementos sometidos a tensión o compresión.
- **Cadenas de galgas extensométricas:** son empleados para realizar mediciones pequeñas midiendo gradientes en las fuerzas que provocan cizallamiento, este tipo de galgas poseen varias rejillas.

### **FIBRA DE BRAGG**

La fibra de Bragg fue demostrada por primera vez en 1978 por Hill et al. Una red de fibra de Bragg es una microestructura que usualmente tiene un grosor de pocos milímetros, es muy precisa y altamente sensible.

El espectro de frecuencias luminosas puede dividirse en 3 bandas generales (Tomasi,2003):

1. Infrarrojo.
2. Visible.
3. Ultravioleta.

En la banda Infrarroja las longitudes de onda luz son muy grandes para que las pueda ver el ojo humano. El ojo humano puede responder a las longitudes de onda de luz de la banda Visible. En la banda Ultravioleta las longitudes de onda de luz son demasiado pequeñas para que el ojo humano pueda verlas.

Cuando se utilizan ondas electromagnéticas de gran frecuencia como las ondas luminosas se recomienda utilizar unidades de longitud de onda y no de frecuencia

Se conoce como longitud de onda a la distancia que ocupa en el espacio un ciclo de onda electromagnética. (Navarro, 2014)

La longitud de onda se expresa como:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde:

$\lambda$ : es la longitud de onda (metros/ciclo)

c: velocidad de la luz (metros por segundo)

f: frecuencia (hercios)

Una fibra óptica se encuentra conformada por un núcleo y recubrimiento y una capa protectora, el recubrimiento refleja la onda de luz hacia el núcleo, esto asegura que la luz sea transmitida al núcleo, y la capa protectora ayuda a evitar daños en los componentes por factores externos.

Topología	Tecnología (variables medidas)
Sensor solo un Punto (single point) 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fabry-Perot (temperatura, presión). Rango &lt; 10 km</li> </ul>
Multi-Punto (Cuasi-Distribuido) 	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Fiber Bragg Grating – FBG –</b> (esfuerzo, temperatura, aceleración, presión, desplazamiento) Rango &lt; 50 km</li> </ul>
Sensado Distribuido 	<u>Fibra Retrodispersión</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Rayleigh (esfuerzo, temperatura) &lt; 70 m</li> <li>Brillouin (esfuerzo, temperatura, dB) &lt; 50 km</li> <li>Raman (temperatura) rango &lt; 20 km</li> </ul>

Figura 5: Comparación de las tecnologías de sensores ópticos

La longitud de onda de la red de Bragg se obtiene:

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda$$

Donde:

$\lambda_B$ : Longitud de onda de la red de Bragg.

$n_{ef}$ : Índice de refracción del núcleo.

$\Lambda$ : Periodo de la microestructura.

La red de Bragg posee muchas características que permiten que se lo use como un sensor, por ejemplo, si una fibra es sometida a tensión o compresión esta se deforma produciendo un cambio en periodo de la microestructura y por ende también cambia la longitud de onda de Bragg, también hay una contribución debida a la variación que existe en el índice de refracción a causa del efecto foto-elástico.

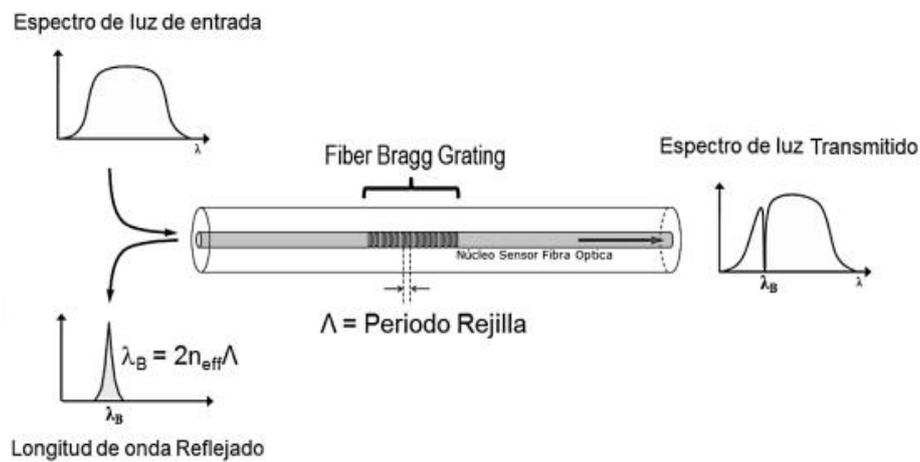


Figura 6: Principio de una red Bragg

### Deformación en una red de Bragg

La dependencia entre la deformación y la red de Bragg se la puede determinar de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} = \left(1 + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial \varepsilon}\right) \Delta\varepsilon = (1 + p_e)\Delta\varepsilon$$

Se obtiene:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k\Delta\epsilon$$

Donde:

k: factor de la red Bragg

$p_e$ : constante fotoelástica

La constante fotoelástica  $p_e$  para la fibra óptica es:

$$p_e \approx -0.21$$

La sensibilidad a la deformación de una red de fibra de Bragg está dada por la expresión:

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\epsilon} = k\Delta\epsilon = 0.79 \lambda_0$$

Se puede usar como referencia que para una longitud de onda de 550 nm la sensibilidad a la deformación se puede simplificar y utilizar el valor de:

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\epsilon} = 1.2 \text{ pm}/(\mu\text{m}/\text{m})$$

## SENSORES QUE SE UTILIZARÁN

Se escogieron los sensores de red de fibra de Bragg para este trabajo, los sensores que se van a utilizar son los siguientes:

### FS62CSS



Figura 7: Sensor FS62CSS

### Especificaciones

Tabla 2: Especificaciones Técnicas sensor FS62CSS

Sensor		
k-factor (sensitivity) <sup>1)</sup>	n.a. [pm/( $\mu\text{m}/\text{m}$ )]	0.79 $\pm$ 0.03 ([1.2])
Resolution <sup>2)</sup>	$\mu\text{m}/\text{m}$	0.5
Measurement range	$\mu\text{m}/\text{m}$ [%]	$\pm$ 5000 [0.5]
Gauge length	mm	10 to 92
Transverse sensitivity	%	0
Operation and storage temperature	$^{\circ}\text{C}$	-20 to +80
Operation and storage humidity	%	< 95
Temperature cross sensitivity <sup>3)</sup>	( $\mu\text{m}/\text{m}$ )/ $^{\circ}\text{C}$	7.3 $\pm$ 1
Sensor bend radius	mm	> 1000
Attachment method	n.a.	Glue (X120)
Dimensions	mm	130 $\pm$ 0.5 x 20 $\pm$ 0.5 x 6 $\pm$ 0.5
Weight <sup>4)</sup>	g	$\varnothing$ 3 mm aramid: 53 $\varnothing$ 3 mm armor: 97
Main materials	n.a.	GFRP, polyurethane, ormocer®
Bragg wavelengths	nm	1500 to 1600 ( $\pm$ 0.5)
Fiber core, cladding and coating diameter	$\mu\text{m}$	8/125/195
FWHM, reflectivity and side lobe suppression	n.a.	> 0.2nm, 20 $\pm$ 6%, > 7dB
Inputs / Outputs		
Cable type	n.a.	$\varnothing$ 3 mm aramid (Hytrel, Kevlar® and PE) or $\varnothing$ 3 mm armor (Hytrel, stainless steel spiral, Kevlar®, stainless steel mesh and PE)
Cable bend radius	mm	> 10
Cable length <sup>5)</sup>	m	0 to 20 $\pm$ 0.05
Connectors	n.a.	FC/APC, SC/APC or NC (No Connectors)

## FS62PSS



Figura 8: Sensor FS62PSS

### Especificaciones

Tabla 3: Especificaciones Técnicas sensor FS62PSS

Sensor		
k-factor (sensitivity) <sup>1)</sup>	n.a. [pm/( $\mu\text{m}/\text{m}$ )]	0.76 $\pm$ 0.03 ([1.2])
Resolution <sup>2)</sup>	$\mu\text{m}/\text{m}$	0.5
Measurement range	$\mu\text{m}/\text{m}$ [%]	$\pm$ 20000 [2]
Gauge length	mm	36
Transverse sensitivity	%	0
Operation and storage temperature	$^{\circ}\text{C}$	-40 ... +100; -20 ... 80
Operation and storage humidity	%	< 95
Temperature cross sensitivity <sup>3)</sup>	( $\mu\text{m}/\text{m}$ )/ $^{\circ}\text{C}$	6.7 $\pm$ 1
Fatigue <sup>4)</sup>	# cycles	$\epsilon_w = \pm 1000 \mu\text{m}/\text{m}$ and $\Delta\epsilon_m \leq 30 \mu\text{m}/\text{m}$ >>10 <sup>7</sup> (aborted after 10 <sup>7</sup> load cycles)
Sensor bend radius	mm	25
Attachment method	n.a.	Glue (Z70, X60, X280 <sup>5)</sup> )
Dimensions	mm	40 $\pm$ 0.5 x 12 $\pm$ 0.5 x 2 $\pm$ 0.5
Weight <sup>6)</sup>	g	5
Main materials	n.a.	Modified acrylic resin, plastic material potting, vinyl, ormocer®
Bragg wavelengths	nm	1500 ... 1600 ( $\pm$ 1)
Fiber core, cladding and coating diameter	$\mu\text{m}$	8/125/195
FWHM, reflectivity and side lobe suppression	n.a.	> 0.2nm, 20 $\pm$ 6%, > 7dB
Inputs / Outputs		
Cable type	n.a.	$\varnothing$ 1 mm braided (fiber glass, silicone varnish)
Cable bend radius	mm	> 5
Cable length <sup>7)</sup>	m	0 ... 6 $\pm$ 0.05
Connectors	n.a.	FC/APC, SC/APC or NC (No Connectors)

## FS62WSS

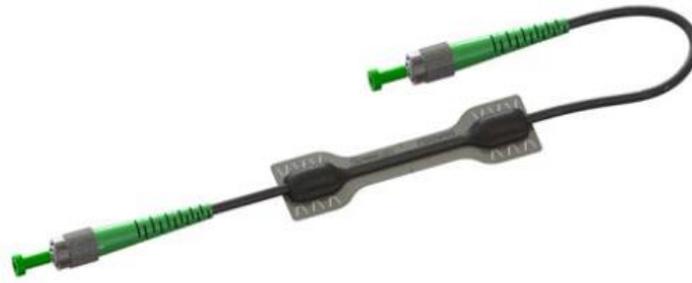


Figura 9: Sensor FS62WSS

## Especificaciones

Tabla 4: Especificaciones Técnicas sensor FS62WSS

Sensor		
k-factor (sensitivity) <sup>1)</sup>	n.a. [pm/( $\mu\text{m}/\text{m}$ )]	0.76 $\pm$ 0.03 ([1.2])
Resolution <sup>2)</sup>	$\mu\text{m}/\text{m}$	0.5
Measurement range	$\mu\text{m}/\text{m}$ [%]	$\pm$ 5000 [0.5]
Gauge length	mm	40
Operation and storage temperature	$^{\circ}\text{C}$	-20 ... +80 <sup>3)</sup>
Operation <sup>4)</sup> and storage humidity	%	$\leq$ 100, < 95
Temperature cross sensitivity <sup>5)</sup>	( $\mu\text{m}/\text{m}$ )/ $^{\circ}\text{C}$	6.6 $\pm$ 1
Sensor bend radius <sup>6)</sup>	mm	>400
Attachment method	n.a.	Spot weld <sup>7)</sup>
Dimensions <sup>8)</sup>	mm	83 $\pm$ 0.5 x 23 $\pm$ 0.5 x 6 $\pm$ 0.5
Weight <sup>9)</sup>	g	$\varnothing$ 3 mm aramid: 19; $\varnothing$ 3 mm armor: 63
Main materials	n.a.	Stainless steel, silicone, X120, ormocer <sup>®</sup>
Bragg wavelengths	nm	1500 ... 1600 ( $\pm$ 0.5)
Fiber core, cladding and coating diameter	$\mu\text{m}$	8/125/195
FWHM, reflectivity and side lobe suppression	n.a.	> 0.2nm, 20 $\pm$ 6%, > 7dB
Inputs / Outputs		
Cable type	n.a.	$\varnothing$ 3 mm aramid (Hytrel, Kevlar <sup>®</sup> and PE) or $\varnothing$ 3 mm armor (Hytrel, stainless steel spiral, Kevlar <sup>®</sup> , stainless steel mesh and PE)
Cable bend radius	mm	> 5
Cable length <sup>10)</sup>	m	0 ... 20 $\pm$ 0.05
Connectors	n.a.	FC/APC, SC/APC or NC (No Connectors)

## FS62RSS

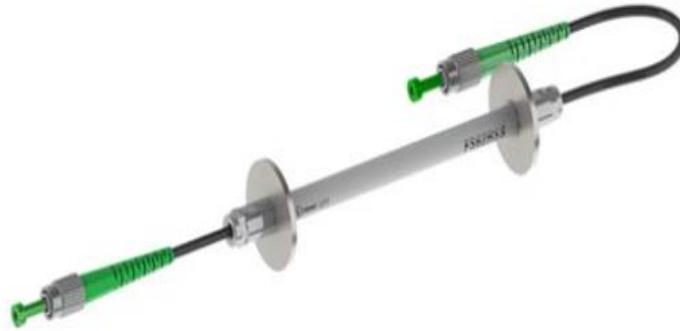


Figura 10: Sensor FS62RSS

## Especificaciones

Tabla 5: Especificaciones Técnicas sensor FS62RSS

Sensor		
k-factor (sensitivity) <sup>1)</sup>	n.a. [pm/( $\mu\text{m}/\text{m}$ )]	0.96 $\pm$ 0.03 ([1.5])
Resolution <sup>2)</sup>	$\mu\text{m}/\text{m}$	0.5
Measurement range	$\mu\text{m}/\text{m}$ [%]	$\pm$ 2500 [0.25]
Gauge length	mm	104
Transverse sensitivity	%	0
Operation and storage temperature	$^{\circ}\text{C}$	-20 ... +80
Operation and storage humidity	%	<95
Temperature cross sensitivity <sup>3)</sup>	( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) $^{\circ}\text{C}$	5.8 $\pm$ 1
Sensor bend radius	n.a.	cannot be bent
Degree of protection <sup>4)</sup>	n.a.	IP68
Attachment method	n.a.	Directly cast; Cable ties
Dimensions	mm	140 $\pm$ 0.5 x $\varnothing$ 30 $\pm$ 0.5
Weight <sup>5)</sup>	g	112
Main materials	n.a.	Stainless steel, ormocer <sup>®</sup>
Bragg wavelengths	nm	1500 ... 1600 ( $\pm$ 0.5)
Fiber core, cladding and coating diameter	$\mu\text{m}$	8/125/195
FWHM, reflectivity and side lobe suppression	n.a.	> 0.2nm, 20 $\pm$ 6%, > 7dB
Inputs / Outputs		
Cable type	n.a.	$\varnothing$ 3 mm armor (Hyrel, stainless steel spiral, Kevlar <sup>®</sup> , stainless steel mesh and PE)
Cable bend radius	mm	>10
Cable length <sup>6)</sup>	m	0 ... 20 $\pm$ 0.05
Connectors	n.a.	FC/APC, SC/APC or NC (No Connectors)

## COMPARACION DE SENSORES

Tabla 6: Comparación de sensores

	Unid	Sensores			
		FS62CSS	FS62PSS	FS62WSS	FS62RSS
Factor K	$[pm/(\frac{\mu m}{m})]$	$0.79 \pm 0.03$	$0.76 \pm 0.03$	$0.76 \pm 0.03$	$0.96 \pm 0.03$
Rango de Medición	$\frac{\mu m}{m}$ [%]	$\pm 5000$ [0.5]	$\pm 2000$ [2]	$\pm 5000$ [0.5]	$\pm 2500$ [0.5]
Temperatura de operación y almacenamiento	°C	-20 a 80	-40 a 100	-20 a 80	-20 a 80
Humedad de operación y almacenamiento	%	< 95	< 95	< 100, < 95	< 95
Radio de curva del sensor	Mm	> 1000	25	> 400	No puede curvar
Método de Unión	-	Pegamento (x120)	Pegamento (x120)	Soldadura de punto	Directo, cables
Fatiga	# ciclos	No datos	1,00E+08	No datos	No datos
Peso (sensor)	g	150	5	82	112
Grado de Protección		-	-	-	IP68
Estructura en la que se usa	-	Hormigón, Acero	Hormigón, Acero	Acero	Hormigón
Material mejor desempeño	-	Hormigón	Hormigón	Acero	Hormigón
Espacio necesario	-	Especio moderado	Poco espacio	Poco espacio	Embebido
Recomendación	-	Muy eficaz usar cuando se dispone de espacio.	Eficaz, se lo usa cuando el espacio es reducido, muy ligero.	Usar en Acero, tener especial cuidado con la soldadura.	Para estructuras que están siendo construidas, cuenta con la protección más alta.

## SENSOR FS62CSS

### Características especiales

- Tiene un diseño resistente y robusto.
- Es versátil en la configuración de los tipos de conectores, longitudes de cables y longitudes de onda.
- El sensor es de alta resistencia a la fatiga.
- Alta resistencia

El sensor FS62CSS se basa en la tecnología newLight la cual fue desarrollada por HBM FiberSensing. El sensor se encuentra diseñado para que se lo pueda colocar fácilmente en diferentes materiales tales como: hormigón, acero o materiales compuestos de fibra.

El sensor se encuentra dotado de recubrimientos de fibra de alta resistencia, esto en adición a las técnicas de fabricación de Fibra de Bragg, garantiza mayores rangos de medición de deformación, mayor resistencia a la fatiga y una mayor precisión en las mediciones.

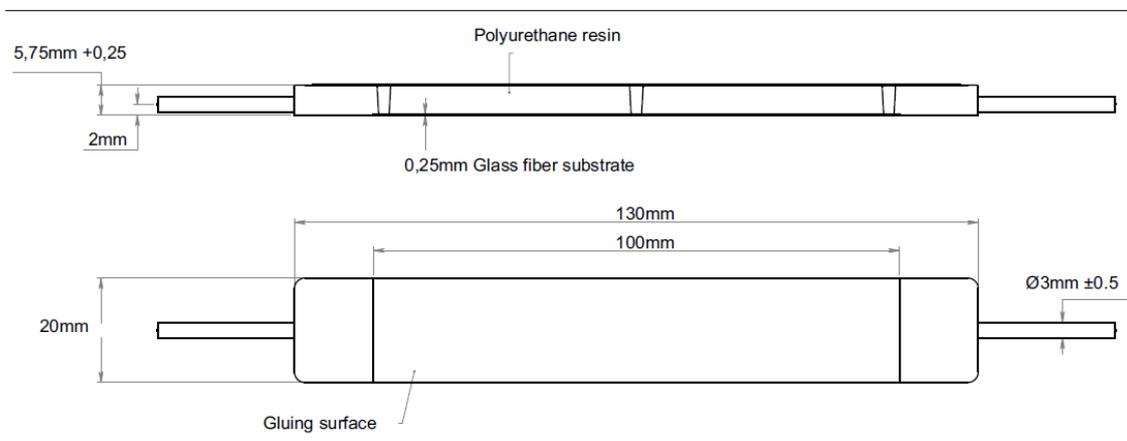


Figura 11: Dimensiones Sensor FS62CSS

## Tecnología de red de Fibra de Bragg

- No necesita gran cantidad de cableado.
- Inmune a interferencia EM/RF
- Se tienen mayores distancias entre los sensores y los sistemas de recolección de datos.
- Compatible con otros sensores.

## Beneficios y aplicaciones

- Rango de medición de alta tensión ( $\pm 0.5\%$ )
- Integración de grandes áreas para medición, lo que ayuda a medir materiales no homogéneos.
- Este sensor es adecuado para llevar a cabo monitoreo estructural de grandes obras civiles que se encuentren en ambientes hostiles y en climas variables.

## Instalación

Materiales necesarios

Tabla 7: Materiales para Instalación

Needed material
Glue. Recommended HBM: 1-X60 (fast curing), 1-X120, 1-X280
Sanding sheets.
Surface cleaning agents. Recommended HBM: 1-RMS1 or 1-RMS1-SPRAY
Tissues. Recommended HBM: 1-8402.0026
Drafting tape. Recommended HBM: 1-KLEBEBAND
Protection. Recommended HBM: 1-ABM75 and/or AK22

### Preparación de área de instalación

Se debe preparar el área de instalación correctamente, para esto se debe seleccionar el área en la cual el sensor será colocado para posteriormente remover capas de protección que tenga el material tales como pintura u oxido, deben ser eliminados para evitar irregularidades en la superficie.

La superficie debe estar previamente lijada para eliminar las imperfecciones

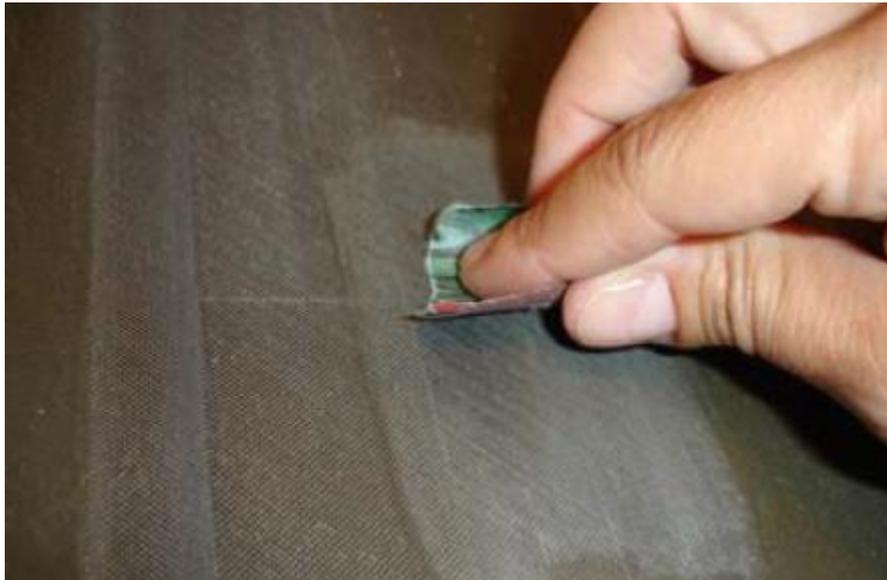


Figura 12: Lijado del material.

Después de que la superficie sea lijada debe ser debidamente limpiada con un agente de limpieza, se recomienda que este sea el 1-RMS1, para garantizar que no existe grasa ni polvo en el área en la que será colocado el sensor.

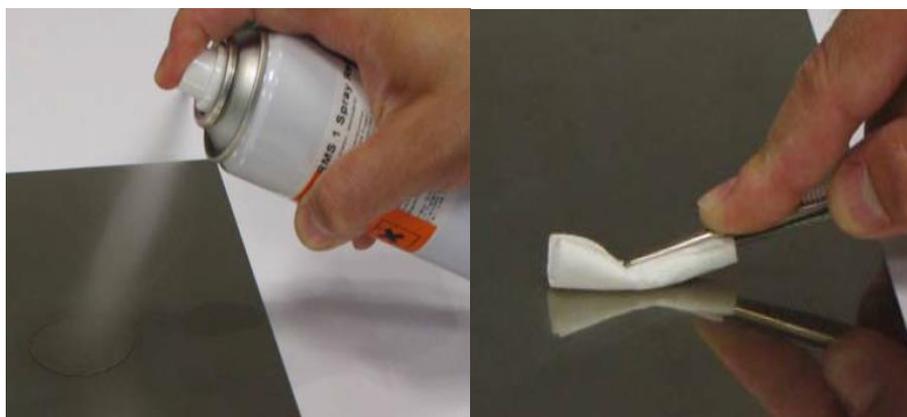


Figura 13: Limpieza del material.

### Referencia de medición

Para llevar a cabo una correcta instalación del sensor es necesario que se tome una referencia y que esta sea marcada en el material para facilitar la instalación, se presenta a continuación la imagen del sensor con su respectiva referencia, estos puntos deben coincidir con los puntos previamente marcados en el material.

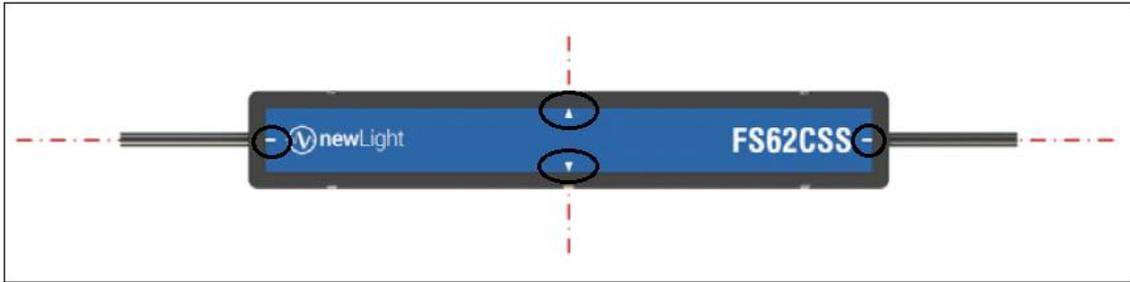


Figura 14: Puntos de referencia.

El sensor debe ser asegurado al material por medio de un adhesivo de curado rápido de la siguiente forma.

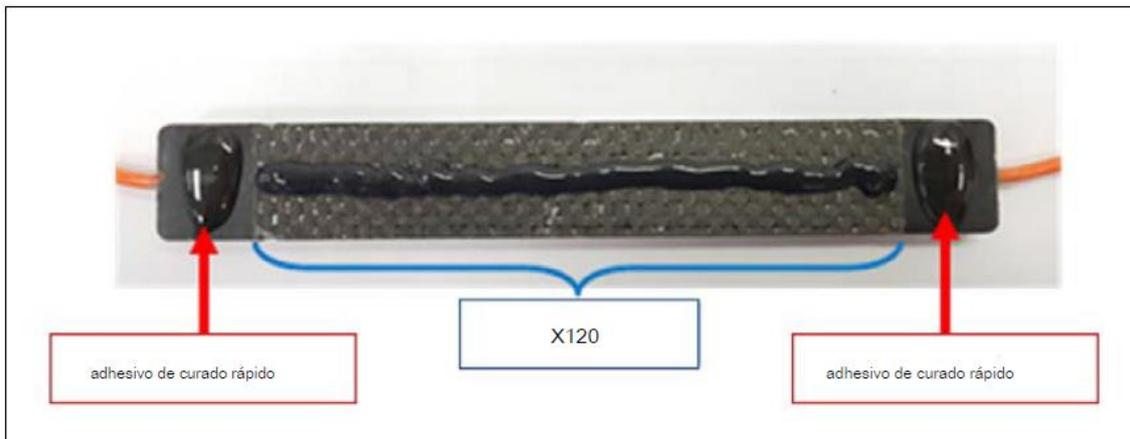


Figura 15: Colocación de adhesivo.

Una vez que el sensor este bien ubicado se debe asegurar los cables con abrazaderas de plástico para evitar que el peso los mismos afecte las mediciones.

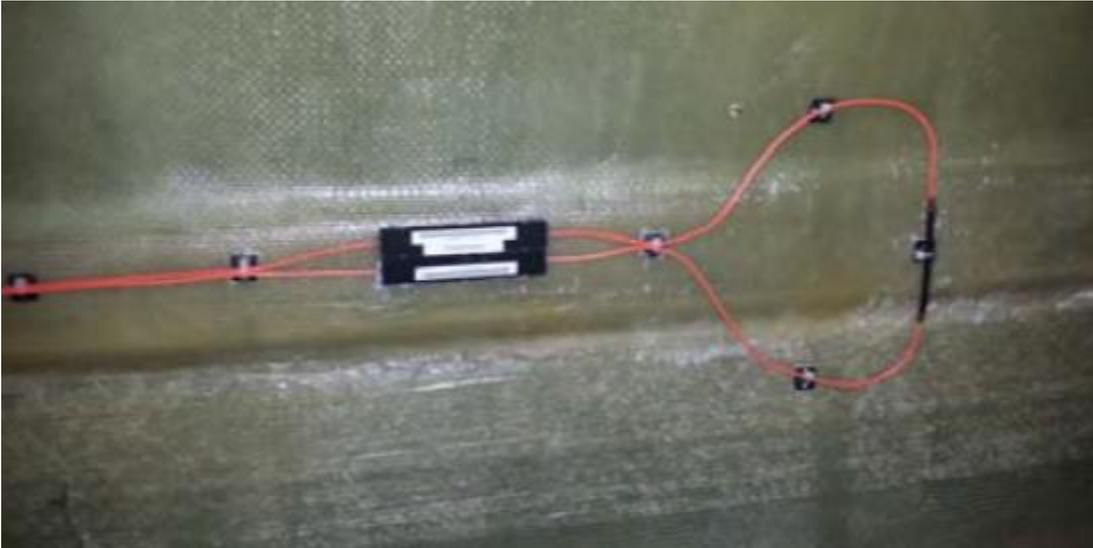


Figura 16: Fijado de cables.

EL sensor es lo suficientemente resistente para no necesitar protección adicional frente al clima u otros factores, pero el adhesivo puede verse afectado por la humedad y algunos efectos ambientales por lo que es indispensable protegerlos para que no sean motivo de falla o error en las mediciones.

### **Temperatura**

Si el lugar en el que se van a llevar a cabo las mediciones tiene fluctuaciones importantes de temperatura es indispensable usar en conjunto con el sensor FS63CTS, un sensor de temperatura el cual nos pueda brindar la información necesaria para las mediciones de esfuerzos, deformaciones o desplazamientos en la estructura, ya que la temperatura juega un papel fundamental en las mediciones. Para calcular el valor de temperatura del sensor se utilizará:

$$T = S_2(\lambda - \lambda_0)^2 + S_1(\lambda - \lambda_0) + S_0$$

Donde:

T: Temperatura medida en °C.

$\lambda$ : es la longitud de onda de Bragg medida por el sensor en nm.

$\lambda_0$ : Longitud de onda de Bragg del sensor de temperatura medido con una referencia de temperatura en nm.

$S_0$ : Sensibilidad de orden cero (temperatura de referencia) en °C.

$S_1$ : Sensibilidad de primer orden en °C/nm

$S_2$ : Sensibilidad de segundo orden en °C/nm<sup>2</sup>

### **Variación de deformación y temperatura**

Para los sensores de deformación de fibra de Bragg cambios en la deformación y de la temperatura tiene efectos importantes en las mediciones es por esta razón que se debe medir la variación de longitud de onda que estos producen por medio de:

$$\frac{(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0} = k \times (\varepsilon_{Load} + (TCS + CTE) \times (T - T_0)) \times 10^6$$

Donde:

$\lambda$ : Longitud de onda de Bragg medida por el sensor en nm.

$\lambda_0$ : Longitud de onda de Bragg del sensor de deformación medida en el instante de referencia en nm.

k: Factor de deformación del sensor.

$\varepsilon_{Load}$ : Deformación mecánica aplicada a la estructura en  $\mu m/m$ .

TCS: Temperatura de la sensibilidad transversal del sensor ( $\mu m/m$ ) / °C.

CTE: Expansión térmica del material ( $\mu m/m$ ) / °C.

$T - T_0$ : Variación de temperatura medida desde el instante de referencia.

### **Medición sin compensación de temperatura**

Si el lugar en el que se va a llevar a cabo el MONITOREO ESTRUCTURAL no presenta cambios ambientales drásticos, que afecten las mediciones se puede calcular el esfuerzo de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{(\lambda - \lambda_0)}{k \times \lambda_0} \times 10^6$$

Donde:

$\varepsilon$ : Deformación medida en  $\mu m/m$ .

$\lambda$ : Longitud de onda de Bragg medida por el sensor en nm.

$\lambda_0$ : Longitud de onda de Bragg del sensor de deformación medida en el instante de referencia en nm.

k: Factor de deformación del sensor.

### **Medición con compensación de temperatura**

Si en el lugar en el que se va a realizar el MONITOREO ESTRUCTURAL existen cambios climáticos drásticos, es necesario compensar las mediciones y corregir las fórmulas de cálculo para obtener los mejores resultados posibles, para esto se recomienda usar un sensor de temperatura lo que nos permite utilizar la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{(\lambda - \lambda_0)}{k \times \lambda_0} \times 10^6 - (TCS + CTE) \times (T - T_0)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Deformación medida en  $\mu m/m$ .

$\lambda$ : Longitud de onda de Bragg medida por el sensor en nm.

$\lambda_0$ : Longitud de onda de Bragg del sensor de deformación medida en el instante de referencia en nm.

k: Factor de deformación del sensor.

TCS: Temperatura de la sensibilidad transversal del sensor ( $\mu m/m$ ) / °C.

CTE: Expansión térmica del material ( $\mu m/m$ ) / °C.

$T - T_0$ : Variación de temperatura medida desde el instante de referencia.

Si siguiendo estos procesos podremos obtener como resultados graficas para una mejor comprensión como se presenta a continuación:

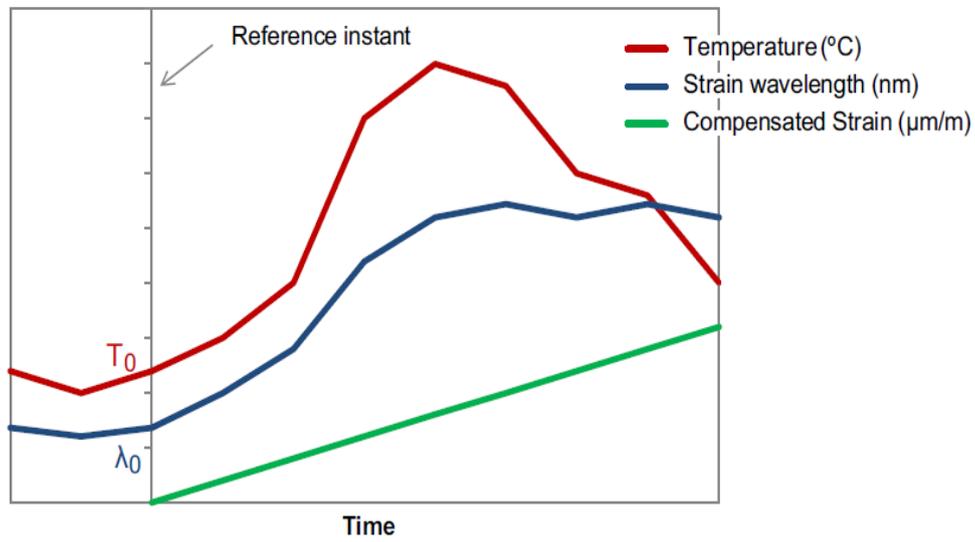


Figura 17: Referencia para compensación de temperatura en mediciones de deformación.

## SENSOR FS62WSS

### Características especiales

- Diseño robusto.
- Instalación de soldadura por puntos.
- Es versátil en la configuración de los tipos de conectores, longitudes de cables y longitudes de onda.
- Alta resistencia.

El sensor FS62WSS es un sensor soldable diseñado para que este pueda unirse fácilmente a superficies metálicas utilizando una máquina de baja potencia de soldadura de punto, este sensor es muy resistente por lo que puede ser utilizado en ambientes exigentes y de difícil acceso.

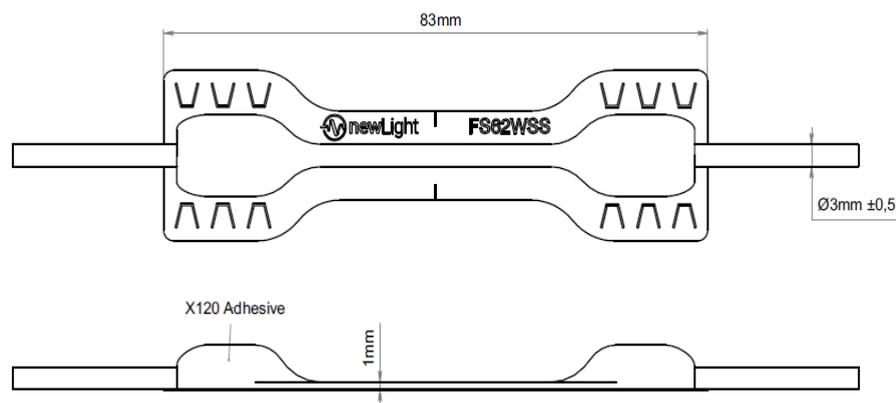


Figura 18: Dimensiones Sensor FS62WSS

### Beneficios y aplicaciones

- Se puede iniciar con las mediciones justo después de su instalación.
- Se puede configurar par diferentes mediciones de deformación y temperatura de funcionamiento.
- Sensor muy recomendable para ambientes agresivos, y para monitorear estructuras civiles.

### Tecnología de red de Fibra de Bragg

- No necesita gran cantidad de cableado.
- Inmune a interferencia EM/RF

- Se tienen mayores distancias entre los sensores y los sistemas de recolección de datos.
- Compatible con otros sensores.

## Instalación

Materiales necesarios

Tabla 8: Materiales para Instalación

Needed equipment
Deburring Machine (optional)
Spot welding machine
Recommended: similar to c30s or c33 from Water Heller GmbH
Needed material
Sanding sheets.
Surface cleaning agents. Recommended HBM: 1-RMS1 or 1-RMS1-SPRAY
Tissues. Recommended HBM: 1-8402.0026
Drafting tape. Recommended HBM: 1-KLEBEBAND
Protection. Recommended HBM: 1-ABM75 and/or AK22

## Preparación de zona de instalación

Se debe retirar toda la pintura u oxido presente en la zona de instalación ya que esto podría ser un problema en el proceso de soldadura, además se necesita que el área limpiada sea regular por lo que se aconseja que esta sea lijada.

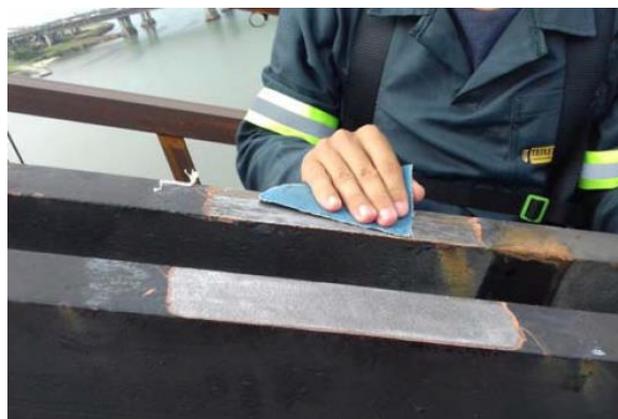


Figura 19: Lijado de superficie

### Referencia de medición

Para llevar a cabo una correcta instalación del sensor es necesario que se tome una referencia y que esta sea marcada en el material para facilitar la instalación.



Figura 20: Puntos de referencia.

### Soldadura

La soldadura del sensor debe realizarse desde el centro de este hacia el exterior con puntos espaciados 1mm aproximadamente, cuando el sensor se encuentre soldado completamente por ambos lados, se debe soldar los puntos de alivio de tensión, los que se encuentran ubicados en los extremos del sensor.

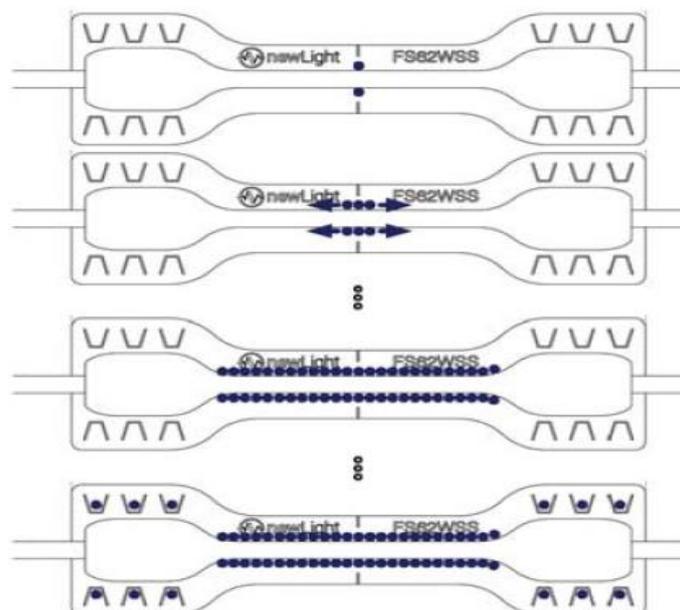


Figura 21: Proceso de soldadura

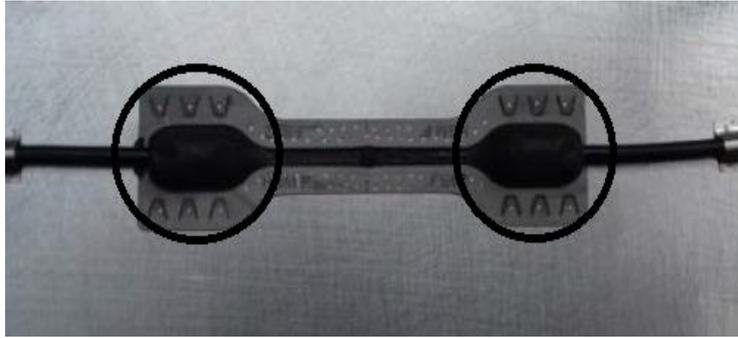


Figura 22: Puntos de alivio de tensión

### Temperatura

Si el lugar en el que se van a llevar a cabo las mediciones tiene fluctuaciones importantes de temperatura es indispensable usar en conjunto con el sensor FS63WTS

$$T = S_2(\lambda - \lambda_0)^2 + S_1(\lambda - \lambda_0) + S_0$$

Donde:

T: Temperatura medida en °C.

$\lambda$ : es la longitud de onda de Bragg medida por el sensor en nm.

$\lambda_0$ : Longitud de onda de Bragg del sensor de temperatura medido con una referencia de temperatura en nm.

$S_0$ : Sensibilidad de orden cero (temperatura de referencia) en °C.

$S_1$ : Sensibilidad de primer orden en °C/nm

$S_2$ : Sensibilidad de segundo orden en °C/nm<sup>2</sup>

### Variación de deformación y temperatura

$$\frac{(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0} = k \times (\varepsilon_{Load} + (TCS + CTE) \times (T - T_0)) \times 10^6$$

Donde:

$\lambda$ : Longitud de onda de Bragg medida por el sensor en nm.

$\lambda_0$ : Longitud de onda de Bragg del sensor de deformación medida en el instante de referencia en nm.

k: Factor de deformación del sensor.

$\varepsilon_{Load}$ : Deformación mecánica aplicada a la estructura en  $\mu m/m$ .

TCS: Temperatura de la sensibilidad transversal del sensor ( $\mu m/m$ ) / °C.

CTE: Expansión térmica del material ( $\mu m/m$ ) / °C.

$T - T_0$ : Variación de temperatura medida desde el instante de referencia.

### **Medición sin compensación de temperatura**

$$\varepsilon = \frac{(\lambda - \lambda_0)}{k \times \lambda_0} \times 10^6$$

Donde:

$\varepsilon$ : Deformación medida en  $\mu m/m$ .

$\lambda$ : Longitud de onda de Bragg medida por el sensor en nm.

$\lambda_0$ : Longitud de onda de Bragg del sensor de deformación medida en el instante de referencia en nm.

k: Factor de deformación del sensor.

### **Medición con compensación de temperatura**

$$\varepsilon = \frac{(\lambda - \lambda_0)}{k \times \lambda_0} \times 10^6 - (TCS + CTE) \times (T - T_0)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Deformación medida en  $\mu m/m$ .

$\lambda$ : Longitud de onda de Bragg medida por el sensor en nm.

$\lambda_0$ : Longitud de onda de Bragg del sensor de deformación medida en el instante de referencia en nm.

$k$ : Factor de deformación del sensor.

TCS: Temperatura de la sensibilidad transversal del sensor ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) /  $^{\circ}\text{C}$ .

CTE: Expansión térmica del material ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) /  $^{\circ}\text{C}$ .

$T - T_0$ : Variación de temperatura medida desde el instante de referencia.

Siguiendo estos procesos podremos obtener como resultados graficas para una mejor comprensión como se presenta a continuación:

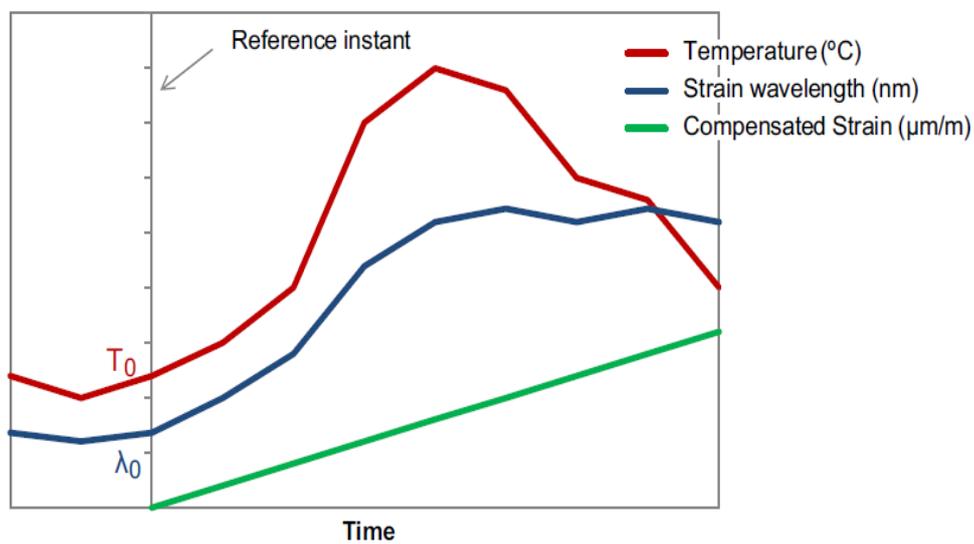


Figura 23: Referencia para compensación de temperatura en mediciones de deformación.

## SENSOR FS62PSS

### Características especiales:

- Emplean nueva tecnología en su diseño y montaje
- Sus materiales de ensamblaje son resistentes y garantizan mediciones fiables.
- La fibra Óptica ofrece beneficios y diseños innovadores en, por lo que los sensores pueden colocarse a kilómetros de distancia del sistema de recolección.

El sensor FS62PSS está basado en newlighth, un tipo de tecnología desarrollada por HBM, la misma que combina los avances de la fibra óptica junto con las ventajas de las galgas extensiométricas, este tipo de sensores utilizan recubrimientos de alta resistencia y técnicas de fabricación de FBG, garantizando así mejores resultados en los rangos de medición, su baja pérdida de curvatura en las ondas receptadas permite una compatibilidad con la mayoría de sistemas de recolección de datos presentes en el mercado.

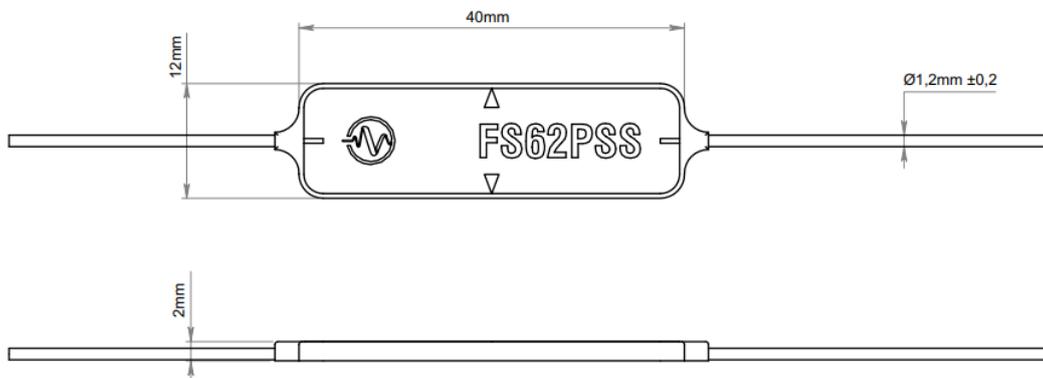


Figura 24: Dimensiones sensor FS62PSS

### Tecnología de red de Fibra de Bragg

- No necesita gran cantidad de cableado.
- Inmune a interferencia EM/RF
- Se tienen mayores distancias entre los sensores y los sistemas de recolección de datos.
- Compatible con otros sensores.

## Beneficios y aplicaciones

- Pueden ser usados en diversos tipos de ambientes, incluso en condiciones extremas debido al triple recubrimiento.
- Son robustos, durables y seguros para el monitoreo estructural.
- Pueden ser utilizados para realizar mediciones en pequeños y grandes elementos.
- Poseen alta resistencia a la tensión.
- Rango de medición de ( $\pm 20000$  micrómetros/metro)
- Resisten temperaturas entre los  $-40$  grados centígrados, hasta los  $100$  grados.
- Existen sensores para mediciones estáticas y dinámicas.

## Instalación

Tabla 9: Materiales necesarios para la instalación

Needed material
Glue. Recommended HBM: 1-Z70, 1-X60, 1-X280
Sandpaper / Emery paper
Surface cleaning agents. Recommended HBM: 1-RMS1 or 1-RMS1-SPRAY
Tissues. Recommended HBM: 1-8402.0026
Polyimide drafting tape. Recommended HBM: 1-KLEBEBAND
Protection: Recommended HBM: 1-ABM75 and/or AK22

## Preparación del área de instalación

El área en el que se realizará la instalación debe ser limpiada y su superficie igualada, posteriormente se aplica como protección del material pintura o epóxico, procurando que el área de trabajo no sea irregular.

Se debe tener en cuenta que la superficie donde será colocado el sensor debe estar libre de polvo para lograr una buena adherencia entre este y el área de trabajo.

El procedimiento de colocación es básicamente el mismo para cualquier tipo de sensor.



Figura 25: Preparación del área de trabajo

### Referencia de medición

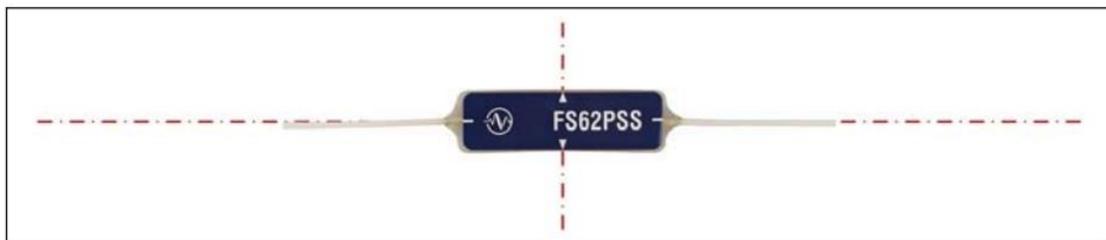


Figura 26: Sensor FS62PSS

Antes de la aplicación del sensor, se realiza una marca en la superficie, esto nos permitirá tener un punto de referencia que facilitará la alineación del sensor considerando la dirección de medición y guías del sensor, para realizar la marca es recomendable utilizar un bolígrafo para determinar el punto de instalación, la longitud de la línea debe ser de 60 milímetros en la dirección de la medición, en la dirección horizontal, para la dirección vertical el largo de la línea de marca debe ser de 40 milímetros, la misma que debe ser dibujada desde el centro del punto de instalación, una vez realizada la marca, se procede a limpiar la superficie.



Figura 27: Marcado de líneas horizontales y verticales y limpieza del área

Para la colocación del sensor se procede a retirar la lámina de protección que se encuentra ubicada a un lado de este, se coloca el instrumento alineado con las líneas verticales y horizontales diseñadas previamente, se aplica cinta adhesiva de poliamida de 10 centímetros de largo, en la parte superior considerando que el sensor no debe ser tocado, también se puede emplear adhesivo Z10 para la colocación del sensor, considerando que los tiempos de secado de los adhesivos oscilan entre los 8 a 10 minutos, una vez finalizado el tiempo se procede a limpiar la superficie alrededor del sensor para retirar excesos, como se observa en las figuras descritas a continuación.

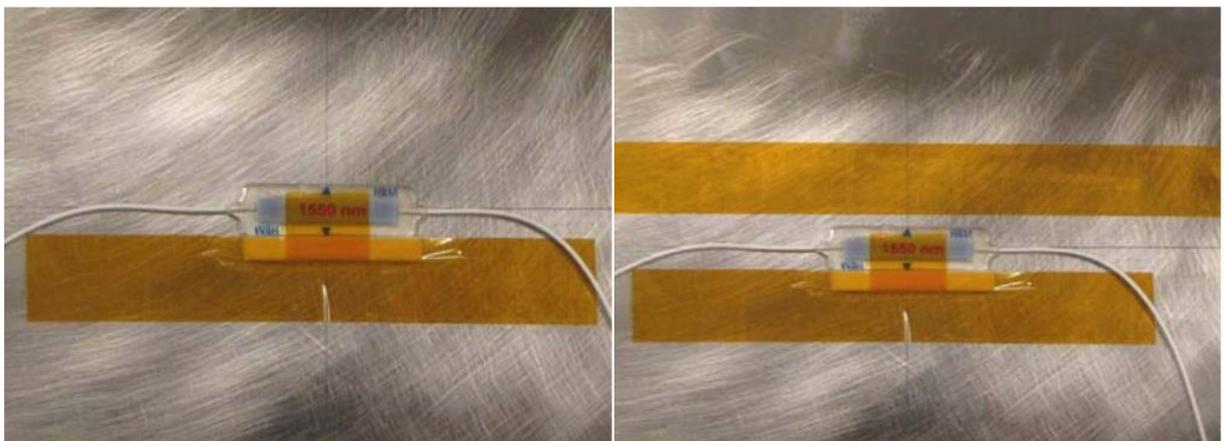


Figura 28: Colocación del sensor con cinta.

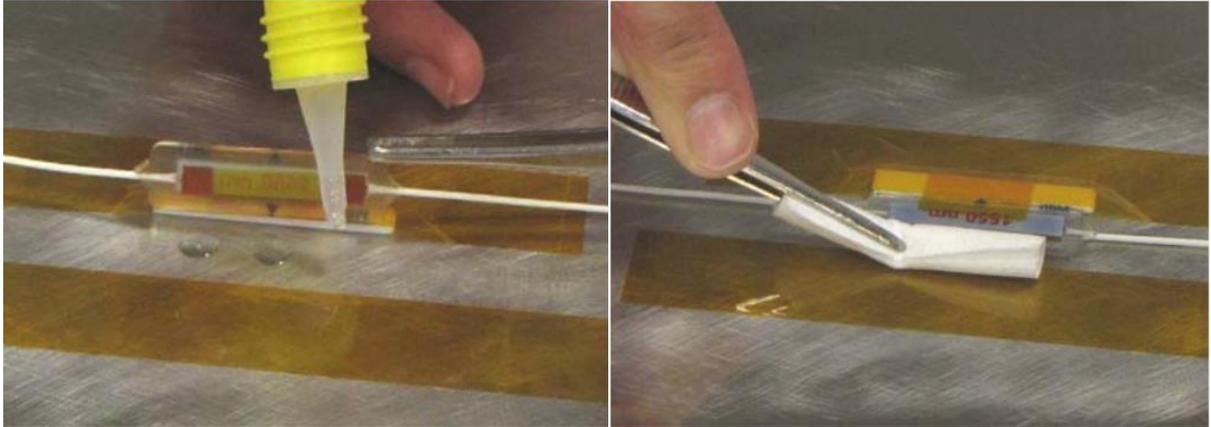


Figura 29: Colocación del sensor con adhesivo Z10.

### **Consideraciones especiales**

Al momento de la colocación se debe evitar los cables para evitar que estos cuelguen y sus curvaturas se mantengan dentro del cable utilizado.

Se recomienda proporcionar un alivio de tensión al momento de la instalación para las fibras ópticas, manteniendo curvaturas suaves fijándolas con la cinta adhesiva de poliamida para evitar errores en las mediciones posteriores y esfuerzos innecesarios en el material.

## SENSOR FS62RSS

### Características especiales

- Fácil instalación.
- Se fija muy bien al material gracias a su rugosidad y discos de anclaje.
- Es versátil en la configuración de los tipos de conectores, longitudes de cables y longitudes de onda.

El sensor rugoso de deformación es un sensor basado en fibra de Bragg el cual se diseñó para ser incrustado dentro del hormigón, el sensor cuenta con un revestimiento de fibra de alta resistencia, mayor resistencia a la fatiga y una gran precisión para las mediciones. Se lo puede utilizar en conjunto con otros sensores de deformación y temperatura, es compatible con muchos sistemas de recopilación de datos.

Cuenta con grado de protección IP68, lo que muestra el grado de protección contra polvo y agua. El primer número (6) representa que el sensor cuenta con la protección más alta al polvo, esto quiere decir que las probabilidades de que polvo entre dentro del sensor son casi nulas. El segundo número (8) muestra el nivel de protección al agua, tomando en cuenta factores como la presión, cantidad de agua, el número 8 denota que el sensor puede tener una inmersión completa y que puede estar sumergido por al menos media hora.

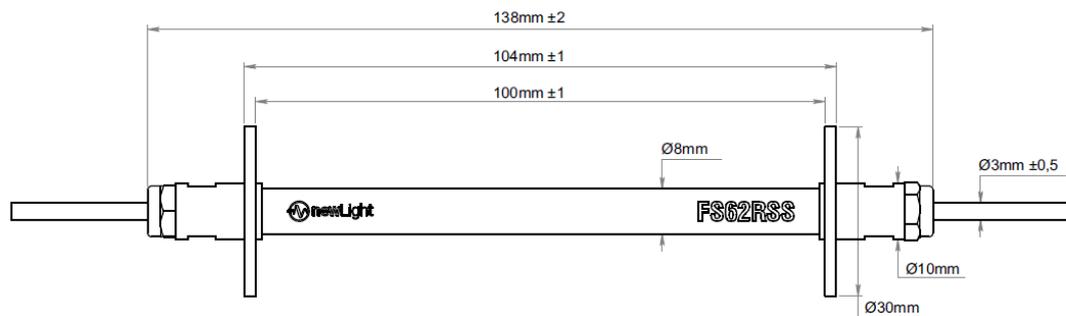


Figura 30: Dimensiones Sensor FS62RSS

## Tecnología de red de Fibra de Bragg

- No necesita gran cantidad de cableado.
- Inmune a interferencia EM/RF
- Se tienen mayores distancias entre los sensores y los sistemas de recolección de datos.
- Compatible con otros sensores.

## Beneficios y aplicaciones

- Posee un grado de protección IP68 que garantiza un cuidadoso diseño.
- Deformación medida sobre la longitud total de anclaje.
- Muy útil para proyectos de investigación y desarrollo de MONITOREO ESTRUCTURAL.

## Instalación

Materiales necesarios

Tabla 10: Materiales para Instalación

Needed material
Fixation: Plastic wire clumps
Protection: Silicone or foam Flexible and resistant protection tube Protection box to be embedded (optional)
Identification: Colored tape/heat shrinking tube/...

## Preparación de área de instalación

Los sensores rugosos de temperatura y deformación están diseñados para ser incrustados en el hormigón por lo que ya presentan la protección necesaria para estar en este ambiente, aunque los cables cuentan con protecciones propias es muy recomendable usar tubos flexibles para que por estos conductos los cables puedan llegar desde el sensor hacia el sistema de recolección de datos



Figura 31: Protección del cable.

Debemos tener en cuenta que la protección de los cables es una parte fundamental en el funcionamiento de los sensores, si en la obra civil se puede tener control en la extracción del encofrado de la sección de hormigón en la que se encuentran los cables, se puede pasar el tubo de protección directamente a través del encofrado, para colocar una caja de protección de los cables posteriormente.



Figura 32: Salida directa de tubo, caja de protección.

Si por contrario no se puede tener control en la extracción del encofrado en la sección en que el tubo de protección va a pasar se debe instalar una caja de protección embebida en el hormigón para precautelar la seguridad del cableado.



Figura 33: Caja de protección empotrada.

### **Fijación del sensor**

El sensor debe ser fijado en las barras de refuerzo o colocado entre las barras según la necesidad del proyecto como se muestra a continuación.



Figura 34: Fijado del sensor.



Figura 35: Fijado del sensor.

## Hormigonado

El proceso de hormigonado es un proceso en el que se debe tener cuidado ya que el vibrado mecánico, así como los agregados más pesados pueden dañar los sensores por lo que es indispensable colocar una red de protección arriba del área en la que están colocados los sensores.



Figura 36: Hormigonado y red de protección.

## Temperatura

Si el lugar en el que se van a llevar a cabo las mediciones tiene fluctuaciones importantes de temperatura es indispensable usar en conjunto con el sensor FS63RTS.

$$T = S_2(\lambda - \lambda_0)^2 + S_1(\lambda - \lambda_0) + S_0$$

Donde:

T: Temperatura medida en °C.

$\lambda$ : es la longitud de onda de Bragg medida por el sensor en nm.

$\lambda_0$ : Longitud de onda de Bragg del sensor de temperatura medido con una referencia de temperatura en nm.

$S_0$ : Sensibilidad de orden cero (temperatura de referencia) en °C.

$S_1$ : Sensibilidad de primer orden en °C/nm

$S_2$ : Sensibilidad de segundo orden en °C/nm<sup>2</sup>

## Variación de deformación y temperatura

Para los sensores de deformación de fibra de Bragg cambios en la deformación y de la temperatura tiene efectos importantes en las mediciones.

$$\frac{(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0} = k \times (\varepsilon_{Load} + (TCS + CTE) \times (T - T_0)) \times 10^6$$

Donde:

$\lambda$ : Longitud de onda de Bragg medida por el sensor en nm.

$\lambda_0$ : Longitud de onda de Bragg del sensor de deformación medida en el instante de referencia en nm.

$k$ : Factor de deformación del sensor.

$\varepsilon_{Load}$ : Deformación mecánica aplicada a la estructura en  $\mu m/m$ .

TCS: Temperatura de la sensibilidad transversal del sensor ( $\mu m/m$ ) / °C.

CTE: Expansión térmica del material ( $\mu m/m$ ) / °C.

$T - T_0$ : Variación de temperatura medida desde el instante de referencia.

### **Medición sin compensación de temperatura**

$$\varepsilon = \frac{(\lambda - \lambda_0)}{k \times \lambda_0} \times 10^6$$

Donde:

$\varepsilon$ : Deformación medida en  $\mu m/m$ .

$\lambda$ : Longitud de onda de Bragg medida por el sensor en nm.

$\lambda_0$ : Longitud de onda de Bragg del sensor de deformación medida en el instante de referencia en nm.

$k$ : Factor de deformación del sensor.

### **Medición con compensación de temperatura**

$$\varepsilon = \frac{(\lambda - \lambda_0)}{k \times \lambda_0} \times 10^6 - (TCS + CTE) \times (T - T_0)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Deformación medida en  $\mu m/m$ .

$\lambda$ : Longitud de onda de Bragg medida por el sensor en nm.

$\lambda_0$ : Longitud de onda de Bragg del sensor de deformación medida en el instante de referencia en nm.

k: Factor de deformación del sensor.

TCS: Temperatura de la sensibilidad transversal del sensor ( $\mu m/m$ ) /  $^{\circ}C$ .

CTE: Expansión térmica del material ( $\mu m/m$ ) /  $^{\circ}C$ .

$T - T_0$ : Variación de temperatura medida desde el instante de referencia.

Siguiendo estos procesos podremos obtener como resultados graficas para una mejor comprensión como se presenta a continuación:

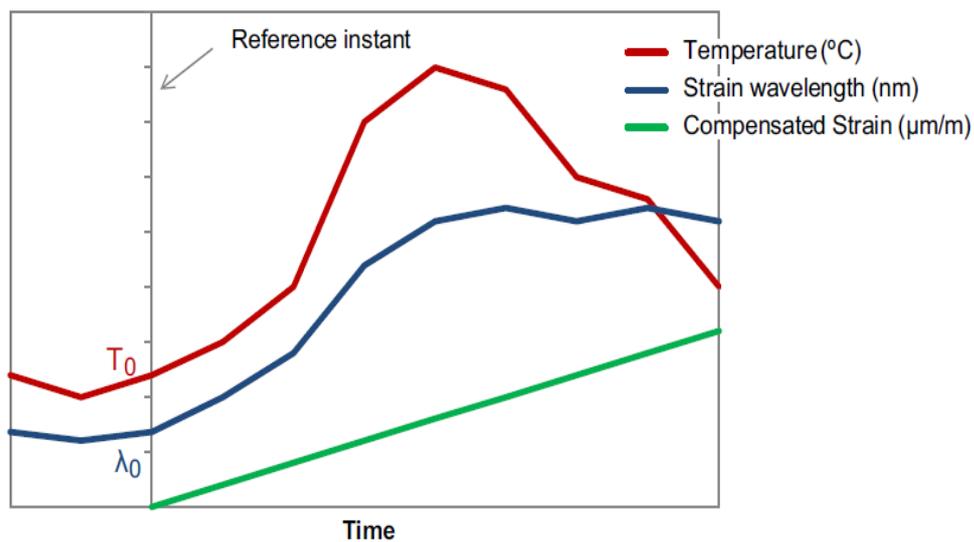


Figura 37: Referencia para compensación de temperatura en mediciones de deformación.

## **CASO DE ESTUDIO PUENTE SOBRE EL RIO PAPALOAPAN**

### **Introducción**

El MONITOREO ESTURCTURAL debe ser llevado a cabo varias veces a lo largo de la vida útil de una estructura, para poder crear un registro histórico de la estructura y poder intervenir de forma eficaz para evitar problemas de funcionamiento, para una estructura nueva es recomendable realizar un monitoreo una vez que esta sea terminada, para tener parámetros de referencia y repetir este proceso en un periodo de 2 a 5 años, siempre que no sea posible un monitoreo constante, esto sería lo más recomendable, porque nos permite crear un registro completo sobre el funcionamiento del puente , lo que mostrara si este presenta cambios en sus parámetros modales iniciales.

Para estructuras que han sido rehabilitadas o reforzadas, se recomienda que se realice un monitoreo antes de los trabajos de refuerzo o rehabilitación y uno después para evaluar los trabajos efectuados en la estructura, posterior a esto se recomienda monitorear a la estructura periódicamente.

El uso de modelos digitales para el análisis de los datos de un monitoreo estructural es esencial, pero en el caso de que se desee realizar un monitoreo en una estructura ya construida de la cual no se cuenten con registros iniciales se debe realizar un modelo estructural analítico por medio de elementos finitos y este será considerado como la condición ideal o inicial del puente, este proceso puede acarrear errores los cuales se deben tomar en cuenta al analizar los datos obtenidos en campo con los del modelo.

Para el puente sobre el Rio Papaloapan se cuenta con un monitoreo constante el cual inició desde su etapa constructiva, y se mantiene hasta el día de hoy, esto nos brinda una gran cantidad de información para poder actuar de forma oportuna

### **Características de la Estructura**

Se debe tener bien especificadas las características de la estructura, se recomienda tener la siguiente información de la estructura que se va a analizar, para este ejemplo se utilizara el Puente sobre el rio Papaloapan, para esto se utilizan modelos y gráficos de la estructura.

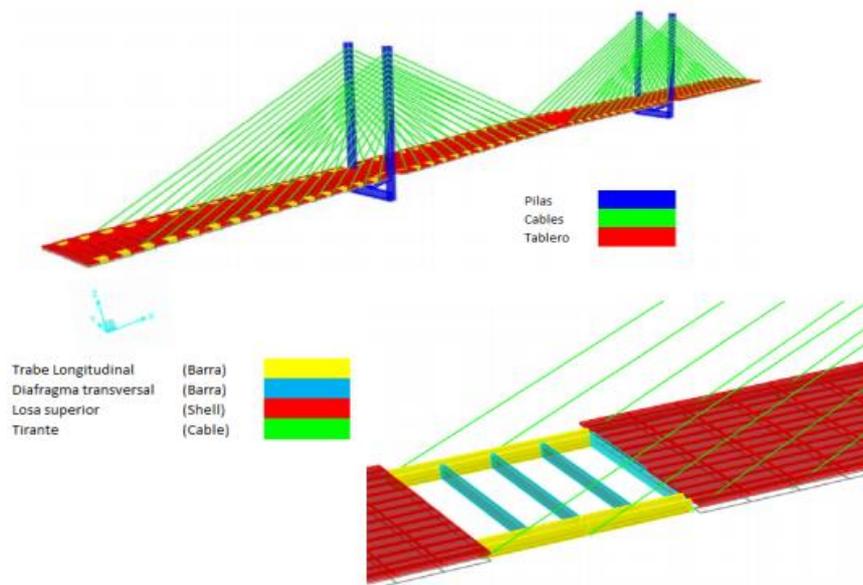
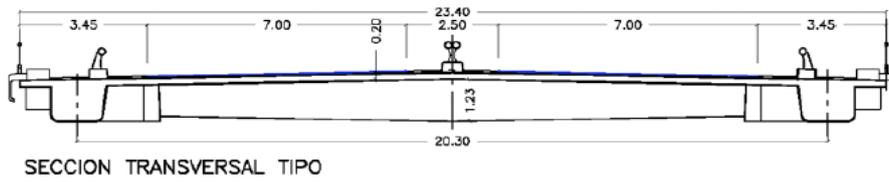
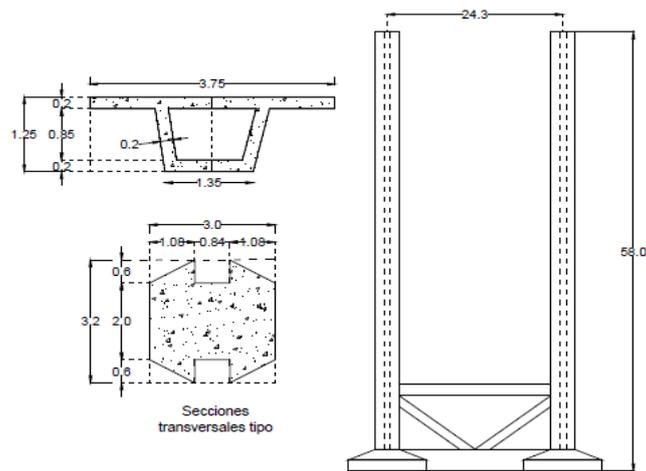
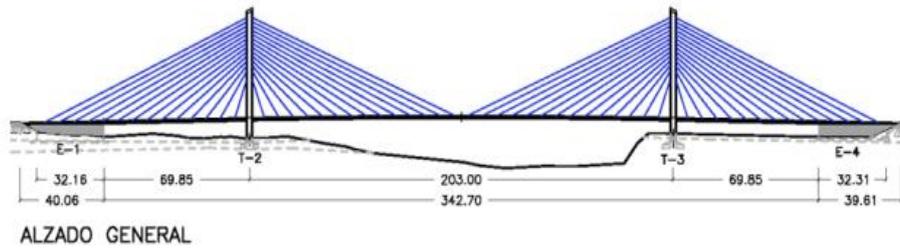


Figura 38: Sketch, elementos principales del puente y modelo de la estructura

El Puente sobre el río Papaloapan es un puente atirantado de 422.37 metros de longitud, cuenta con 3 luces, la principal de 203 metros de longitud y 2 secundarias de 70 metros. Se tiene un tablero de 32 metros, cuenta con 4 torres de 58 metros de altura, a cada torre están anclados 28 cables, la superestructura está formada por vigas cajón de concreto presforzado, la losa superior es de 20 cm.

### Objetivo del Monitoreo

Los puentes son estructuras de alta prioridad, por esta razón el poder actuar de forma oportuna en labores de mantenimiento evita que la vida útil de la estructura o que su funcionamiento se vea afectado gravemente por factores climáticos, eventos extremos o el paso del tiempo, en este puente se llevó a cabo un monitoreo continuo desde las etapas constructivas del mismo, esto brinda mucha información sobre el comportamiento del puente y su reacción frente a los mantenimientos.

### Sensores

Los sensores que se utilizaron para este monitoreo estructural fueron los siguientes.

Tabla 11: Sensores utilizados en el puente del Río Papaloapan.

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

### Comparación entre sensores

Los sensores que se utilizaron en la estructura son sensores de fibra óptica basados en la red de fibra de Bragg al igual que los sensores que analizamos en este documento, esto se debe a que este tipo de sensores nos brindan mucha precisión en largas distancias de medición y posee mucha resistencia frente a ambientes hostiles.

El sensor de deformación que se utilizó en el puente el os5100, presenta especificaciones muy similares al sensor de deformación FS62CSS y FS62RSS, tanto en rangos de medición, temperatura y grado de protección.

Tabla 12: Comparación

	Unid	FS62CSS	FS62RSS	Os5100
Grado de Protección	-	-	IP68	IP67
Rango de Medición	$\frac{\mu m}{m}$	$\pm 5000$ [0.5]	$\pm 2500$ [0.52]	$\pm 5000$
Temperatura de operación y almacenamiento	°C	-20 a 80	-20 a 80	-40 a 80

Estos son algunos de los factores más relevantes de los sensores, y como podemos observar no hay mucha diferencia entre ellos.

### Distribución de los sensores

Realizar un monitoreo estructural es una actividad compleja por lo que no se recomienda que se use un solo tipo de sensor ya que se estaría recibiendo solo una parte de los datos necesarios para poder estudiar el comportamiento de una estructura frente a diversos efectos, es porque se recomienda utilizar varias configuraciones sincronizadas de varios tipos de sensores para recibir la información más completa posible. Se debe buscar que los sensores se ubiquen de forma simétrica para cubrir toda la longitud del puente.

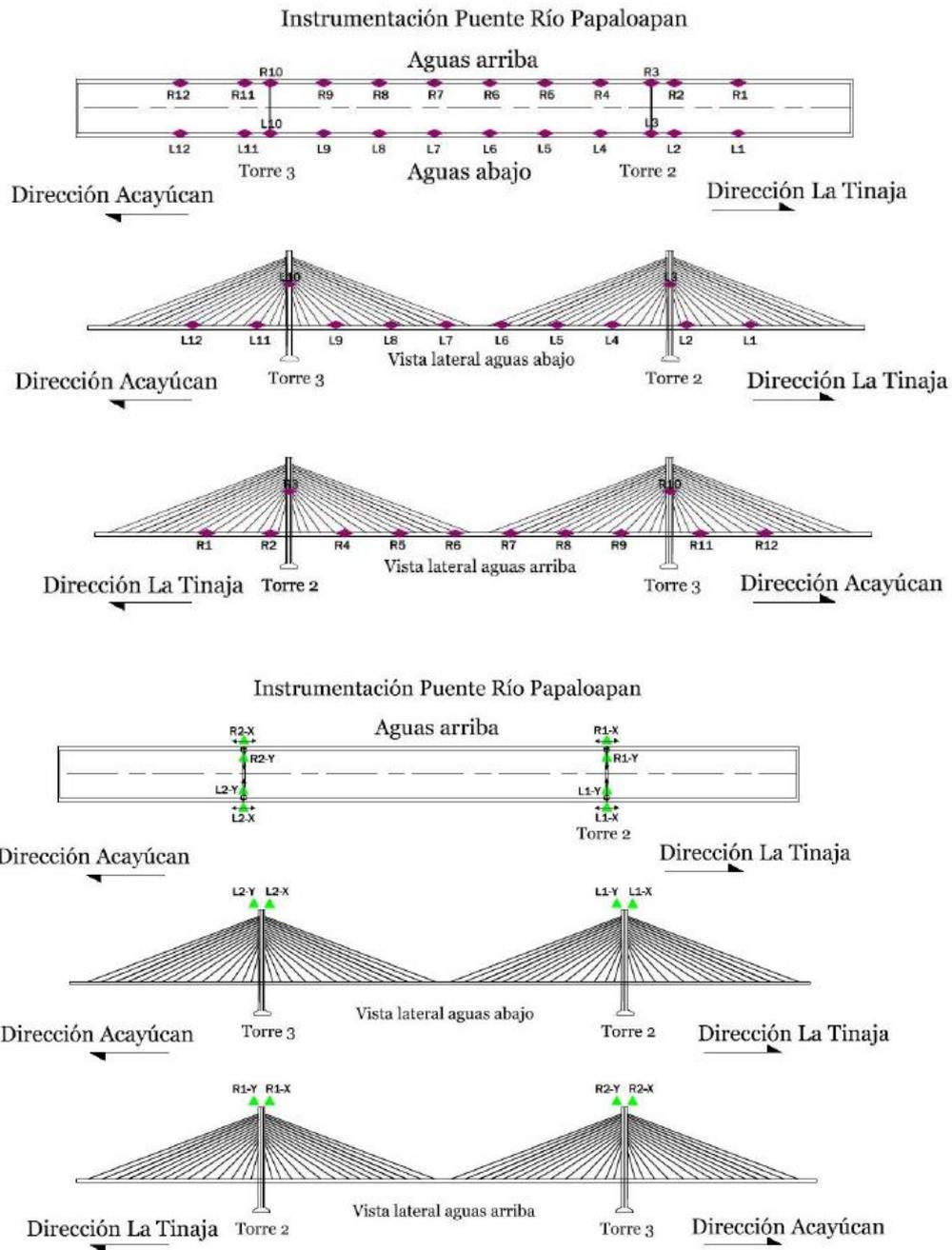


Figura 39: Distribución Sensores en puente

## Datos Obtenidos

Los datos que arrojan los sensores son la deformación, aceleración o inclinación que siente el sensor y el tiempo en el cual este ocurre, estos datos se los coloca en gráficas para facilitar su análisis.

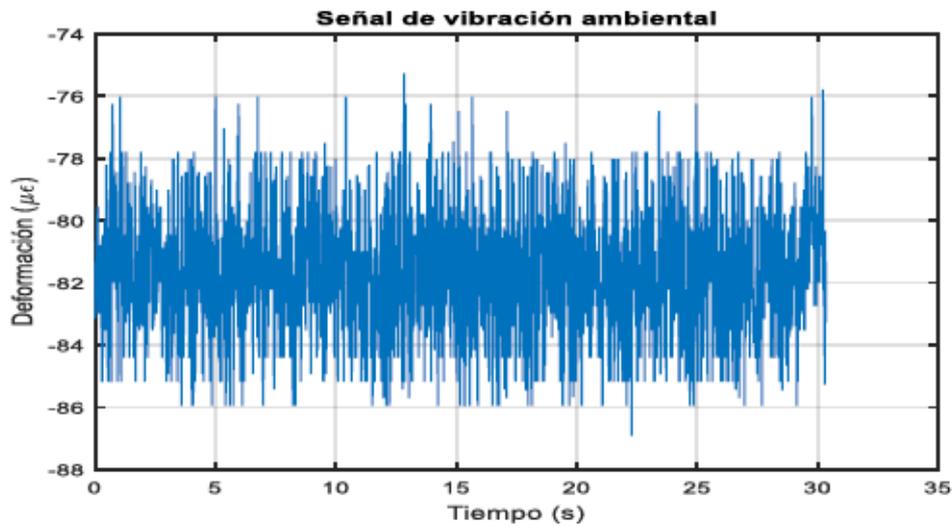


Figura 40: Deformación producida por vibración ambiental

Se busca llegar a gráficos de referencia en los que se muestre las fechas en las que se realizaron mantenimientos en el puente o eventos extremos que pueden afectar al mismo, esto se realiza para cada sensor.

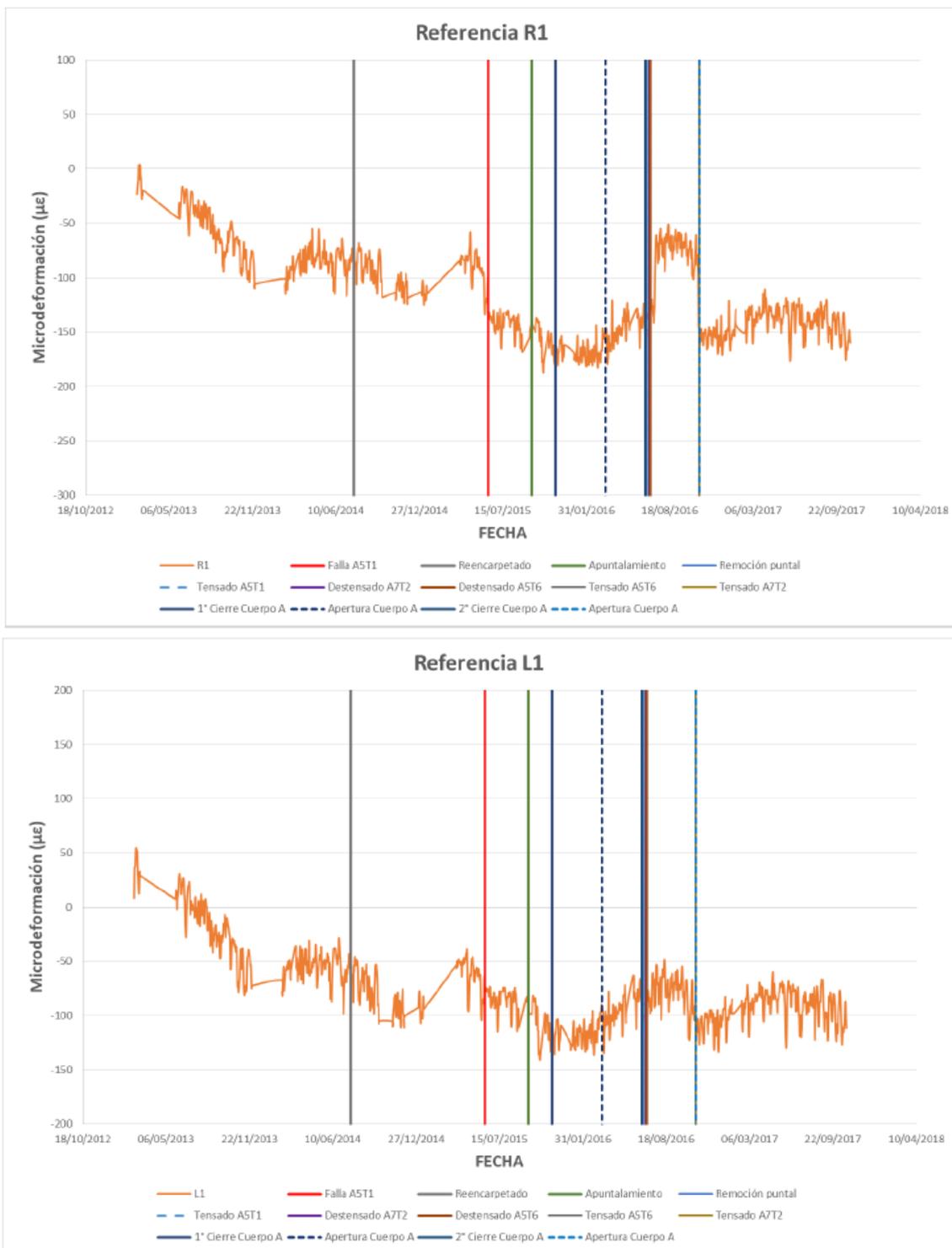


Figura 41: Gráficas de referencia de sensor derecho e izquierdo

## DISCUSION

En este trabajo se buscó determinar la importancia del MONITOREO ESTRUCTURAL y cuáles serían los sensores más recomendados al momento de realizar el monitoreo de un puente, un puente es una estructura de gran importancia por lo que una correcta y oportuna intervención puede garantizar la seguridad del puente y reducir costos de mantenimiento o rehabilitación.

Se trato de recopilar información respecto a los tipos de sensores existentes en el mercado y determinar cuál sería la opción más viable al momento de monitorear un puente, se logró obtener las especificaciones técnicas de cada sensor las cuales fueron provistas por la empresa HBM. No se logró conseguir documentos en los que se mostraran los sensores que escogimos en obra ya que la mayoría de las empresas que los usan no comparten esta información, también se quería conseguir los sensores y probarlos en laboratorio, pero por su costo elevado y tiempos de envío prolongados no fue factible utilizarlos.

Se a logrado cubrir una parte importante sobre el MONITOREO ESTRUCTURAL pero todavía quedan muchas más áreas por explorar y analizar como es el campo del análisis de datos el cual no se lo cubrió en este documento, en este trabajo se buscó establecer cuales son las tecnologías que más benefician utilizar en un puente, así como su instalación y diversas consideraciones que se necesitan tener en cuenta cuando se utilizan sensores de fibra óptica.

## CONCLUSIONES

El MONITOREO ESTRUCTURAL es una gran herramienta que nos puede ayudar mejorar el funcionamiento de los puentes y a actuar oportunamente frente a diversos sucesos que pueden afectar la seguridad y la vida útil de un puente. La mejor opción sería que el monitoreo sea constante para poder crear un registro que ayude a entender el funcionamiento del puente. Cuando se realiza un monitoreo se debe utilizar varios tipos de sensores que ayuden a obtener toda la información necesaria, por ejemplo si utilizamos acelerómetros, estos nos ayudaran a encontrar los periodos de vibración de la estructura, los inclinómetros a ver si se tiene inclinaciones no deseadas en las torres, cada tipo de sensor nos provee información específica que debe ser unificada para estudiar un puente, es por esta razón que si solo se utiliza un tipo de sensor la información será incompleta.

Los sensores de fibra de Bragg son una gran opción ya que al tener perdidas de precisión muy pequeñas por kilómetro recorrido permiten tener gran exactitud al momento de realizar mediciones, por esto y por su gran resistencia frente a factores externos lo convierte en una opción muy viable, su costo puede ser mayor en comparación con otros tipos de sensores, pero durabilidad y su precisión compensan los costos, si es que en nuestro estudio no necesitamos realizar mediciones con alta precisión sería mejor recurrir a otros tipos de sensores no basados en fibra óptica.

Después de considerar todos los procesos de instalación y las capacidades de cada sensor podemos escoger el dispositivo que más se adapte a nuestras necesidades. Al realizar un MONITOREO ESTRUCTURAL en regiones andinas remotas tenemos que considerar que la temperatura tiene un papel fundamental en las mediciones, es por ello por lo que se deben utilizar los sensores de deformación en combinación con sensores de temperatura para poder compensar las mediciones y ser más precisos en el monitoreo.

Si el puente que se va a monitorear se encuentra en construcción el dispositivo que más nos beneficiaría utilizar sería el sensor de deformación FS62RSS, con su respectivo sensor de temperatura FS63RTS, este al encontrarse embebido en el hormigón contara con mayor durabilidad y resistencia a diversos factores externos que pueden afectar el desempeño del sensor.

Si la estructura ya que encuentra construida el sensor que debemos utilizar es el FS62CSS, con su sensor de temperatura FS63CTS, si se toman las medidas necesarias las cuales

fueron expuestas en la sección anterior este sensor será muy duradero y nos permitirá tomar los datos de forma segura y precisa.

No todas las estructuras en las que se va a llevar a cabo el MONITOREO ESTRUCTURAL van a ser de hormigón, algunas serán de acero es por esta razón que la mejor opción para una estructura de acero será el sensor de deformación FS62RSS, con su sensor de temperatura FS63RTS, este cuenta con un diseño resistente y de fácil instalación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BDI. (2006). *BDI Strain Transducer ST 350*. Bridge Diagnostic .
- E-C246, T. R. (2019). *Structural Monitoring*. Washington, D.C.
- HBM. (n.d.). *FS62CSS, FS63CTS Composite Strain and Temperature Sensors*. Maia: HBM FiberSensing.
- HBM. (n.d.). *FS62PSS, FS63LTS Patch Strain and Laboratory Temperature Sensors*. Maia: HBM FiberSensing.
- HBM. (n.d.). *FS62RSS, FS63TRS Rugged Strain and Temperature Sensor*. Maia: HBM FiberSensing .
- HBM. (n.d.). *FS62WSS, FS63WTS Weldable Strain and Temperature Sensor*. Maia: HBM FiberSensing.
- Navarro, F. (2014). *Sensores de fibra óptica FBG para el monitoreo de la salud estructural de los puentes*. Costa Rica: Tecnología en Marcha .
- Ortiz, A., Jara, M., & Jara, J. (2016). *Análisis Evolutivo de Ouentes Atirantados Considerando tres componentes Sísmicas*. Mérida.
- PITRA. (2016). *Monitoreo Estructural de la Superestructura del Puente Sobre el Río Tenorio*. San José : Unidad de Puentes.
- Quintana, J., Carrión, F., & Martínez, A. (2018). *Actualización y Seguimiento de los Indices de Desempeño Estructural del Puente Río Papaloapan* . Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte.
- Tomasi, w. (2003). *Comunicaciones con fibra óptica*. México: Pearson.