

Salud Estructural en Puentes: Monitoreo con Sensores de Fibra Óptica Fbg (Fiber Bragg Grating)

José Leonardo Jácome Carrascal

Trabajo de Grado para Optar el Título de Especialista en Estructuras

Director

Álvaro Viviescas Jaimes

Ingeniero Civil - PhD

Universidad Industrial De Santander
Facultad De Ingeniería Fisicomecánicas
Escuela De Ingeniería Civil
Especialización en Estructuras
Bucaramanga

2019

Tabla de contenido

	pág.
Resumen	9
Introducción	11
1. Salud estructural	14
1.1 Monitoreo de la Salud estructural	14
1.1.1 El objetivo principal del monitoreo estructural	15
1.1.2 El monitoreo como estrategia de gestión	17
2. Los sistemas de monitoreo de salud estructural	23
2.1 Técnicas aplicadas en monitoreo de la salud estructural (MSE) de puentes	26
2.2 Sensor de rejilla de fibra bragg	28
2.3 Técnicas de evaluación de corrosión	31
2.4 Técnica de monitoreo con sensores de emisión acústica (AE)	32
2.5 Técnica de monitoreo con sensores electromagnéticos	34
2.6 Técnica de monitoreo con sensores inalámbricos	35
2.7 Técnica de monitoreo con sensores piezoeléctricos	36
3. Fibra óptica	39
3.1 Clasificación básica de fibra óptica	40
3.2 Estructura de una fibra óptica	41
3.3 Tipos de Sensores de Fibra Óptica	43
3.3.1 Parámetros a medir	44
3.3.2 Tipos de Aplicación	44
3.3.3 Medio Sensitivo	46

4. Sensores de fibra óptica FBG (Fiber Bragg Grating) para el monitoreo de la salud estructural de puentes	48
4.1 Generalidades de los sensores de fibra óptica FBG	50
4.2 Fundamentos de los sensores de Fibra Óptica FBG.	51
4.3 Medidor de esfuerzo FBG	55
4.4 Medidor de Temperatura FBG	57
4.5 Medidor de Aceleraciones FBG	58
5. Casos de éxito	59
5.1 Caso 1. Puente El Carrizo, en México	60
5.2 Caso 2. Puente Ruta Nacional No. 32, en Costa Rica	62
5.3 Caso 3. Puente Río Papaloapan, en México	64
5.4 Caso 4. Puente Hampden, en Australia	66
5.5 Caso 5. Puente de Manhattan, Nueva York, en Estados Unidos	67
5.6 Caso 6. El Gran Puente de Sapgyo, Corea del Sur.	69
5.7 Caso 7. Puentes Arsenal- Rock Island, IL.	71
6. Análisis crítico	73
6.1 Análisis de la infraestructura de puentes en Colombia	73
6.2 Análisis de la importancia de la Fibra Óptica	75
6.3 Análisis de la estimación de costos de implementación de un sistema MSE en Colombia	76
6.4 Análisis del estado actual normativo para el monitoreo de puentes en Colombia	79
7. Conclusiones	81
Referencias	83

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. Monitoreo estructural y niveles de detección de daños	18
Tabla 2. Distribución de fallas según material estructural empleado	20
Tabla 3. Distribución de fallas según la etapa del proyecto.	21
Tabla 4. Distribución de fallas según la edad de las construcciones	21
Tabla 5. Características generales de las fibras ópticas	47
Tabla 6. Tipos de Sensores de FBG	52
Tabla 7. Monitoreo de puentes con Fibra óptica	59
Tabla 8. Equipos y sensores de fibra óptica elegidos para el puente Río Papaloapan.	65
Tabla 9. Puentes con mayor longitud construidos en Colombia	74
Tabla 10. Ventajas y Desventajas de la fibra óptica	75

Lista de figuras

	pág.
Figura 1. Niveles de las técnicas de monitoreo de salud estructural según su alcance.	17
Figura 2. Elaboración propia de la gestión en el monitoreo de la Salud estructural	19
Figura 3. Principales técnicas de monitorización	24
Figura 4. 7 pasos secuenciales para una óptima implementación de monitoreo estructural.	27
Figura 5. Muestra (a) sensor de fibra óptica, (b) de fibra Bragg grating sensor, (c) sensor piezoeléctrico, (d) sensor electroquímico, (e) sistema de sensor inalámbrico, y (f) Sensores de monitoreo de tensión y grietas de hormigón.	28
Figura 6. Sensor de Bragg en el núcleo una fibra mediante un láser de UV y una máscara.	29
Figura 7. Representación esquemática de la reflexión de una frecuencia determinada de la luz viajando en la fibra óptica en una red de Bragg	29
Figura 8. La multiplexación por división de longitud de onda	31
Figura 9. Representación esquemática del espectro típico de una red de Bragg.	31
Figura 10. Instrumentación para el método potencial semiceldas descrito en la norma ASTM C876.	32
Figura 11. Puente de San Francisco Oakland Bay, monitoreo acústico de grietas.	33
Figura 12. Energía vs posición x grieta en condiciones de carga de fatiga.	34
Figura 13. Sensores magnéticos para indicar varias clases de defectos en cuerdas de acero	35
Figura 14. Red inalámbrica de sensores.	36
Figura 15. Los materiales piezoeléctricos	37
Figura 16. Transductor piezoeléctrico	38
Figura 17. Tipos de fibra óptica	40
Figura 18. Capas de una fibra óptica.	42
Figura 19. Esquema de una fibra óptica con rejilla FBG (Fiber Bragg Grating)	42
Figura 20. Transmisión de la luz en una fibra óptica, n_1 , n_2 = índice de refracción del núcleo, de la corteza.	43

Figura 21. Tipos de sensores de fibra óptica	43
Figura 22. Sensores localizados.	45
Figura 23. Sensor distribuido Brillouin Scattering	45
Figura 24. Sensores multiplicados	46
Figura 25. Sensores de fibra óptica con diferentes técnicas de encapsulado.	49
Figura 26. Instrumentación y detalles de sensor fibra óptica.	50
Figura 27. Croquis que muestra los detalles del SFO para la prueba de fatiga. Todas las dimensiones están en mm.	50
Figura 28. Características de transmisión y reflexión en los sensores de fibra óptica FBG.	53
Figura 29. Sensor óptico FBG de esfuerzo: Os3155	56
Figura 30. Ejemplo de medición de un sensor óptico FBG de esfuerzo con compensación de temperatura.	56
Figura 31. Sensores ópticos FBG de temperatura.	58
Figura 32. Acelerómetro FBG para medición de vibraciones: Os 7100.	58
Figura 33. Puente el Carrizo	61
Figura 34. El puente sobre el río Virilla en la Ruta Nacional No. 32	63
Figura 35. Sensores y las unidades de adquisición de datos de aceleración.	63
Figura 36. Puente Río Papaloapan	64
Figura 37. El puente Hampden, en Australia. Adaptado de Micron_Optics (2016)	66
Figura 38. Sistema de Monitoreo del puente colgante de Hampden.	67
Figura 39. El puente Manhattan.	68
Figura 40. Sistema de Monitoreo del puente Manhattan.	69
Figura 41. El Gran Puente de Sapgyo, Corea del Sur.	70
Figura 42. Sistema de sensores y adquisición de datos.	70
Figura 43. Puente Arsenal	71

Resumen

TITULO: SALUD ESTRUCTURAL EN PUENTES: MONITOREO CON
SENSORES DE FIBRA ÒPTICA FBG (FIBER BRAGG GRATING)

AUTOR: JOSE LEONARDO JACOME CARRASCAL

PALABRAS CLAVE: Salud estructural, monitoreo de puentes, sensores de fibra óptica

DESCRIPCION:

En la actualidad se han desarrollado técnicas de monitoreo estructural con el propósito de proveer información que permita tener un control de la seguridad, la integridad y funcionamiento de los puentes. Es un tema de gran importancia para la gestión eficiente de tiempo en inspecciones y revisiones, así como la reducción de costos, brindando una mayor seguridad para los usuarios. por el conocimiento del comportamiento estructural que garantice estructuras en buenas condiciones para el tránsito vehicular y la seguridad vial.

Esta investigación presenta una revisión general del estado del arte sobre algunos métodos de monitoreo de la salud estructural en puentes con particular énfasis en los sensores de fibra óptica FBG (Fiber Bragg Grating), realizando un acercamiento teórico para su comprensión, conocer las aplicaciones y diferentes experiencias en el mundo en puentes que han sido monitoreados con sensores de fibra óptica. Entender sobre la caracterización de las diferentes señales emitidas y como se relacionan estas con los parámetros a inspeccionar, tales como la deformación, temperatura y demás fenómenos físicos que afecten la salud estructural de los puentes. Así mismo en Colombia existen diferentes escenarios que fueron analizados críticamente bajo aspectos, normativos, económicos y académicos, necesarios ante la implementación de monitoreo en puentes con sensores de fibra óptica.

*Monografía

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director, PhD Álvaro Viviescas Jaimes

Abstract

TITLE: STRUCTURAL HEALTH IN BRIDGES: MONITORING WITH OPTICAL FIBER SENSORS FBG (FIBER BRAGG GRATING)
AUTHOR: JOSE LEONARDO JACOME CARRASCAL
KEYWORD: Structural health, bridges monitoring, optical fiber sensors

DESCRIPTION:

At present, structural monitoring techniques have been developed with the purpose of providing information that allows to have a control of the safety, integrity and operation of the bridges. It is a topic of great importance for the efficient management of time in inspections and reviews, as well as the reduction of costs, providing greater security for users. for the knowledge of the structural behavior that guarantees structures in good conditions for vehicular traffic and road safety.

This research presents a general review of the state of the art on some methods of structural health monitoring in bridges with particular emphasis on FBG fiber optic sensors (Fiber Bragg Grating), making a theoretical approach to their understanding, knowing the applications and different experiences in the world in bridges that have been monitored with fiber optic sensors. Understand the characterization of the different emitted signals and how they relate to the parameters to be inspected, such as deformation, temperature and other physical phenomena that affect the structural health of the bridges. Also in Colombia there are different scenarios that were critically analyzed under regulatory, economic and academic aspects, that are necessary issues before the implementation of monitoring in bridges with fiber optic sensors.

*Monografía

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director, PhD Álvaro Viviescas Jaimes

Introducción

El monitoreo de la salud estructural MSE o en inglés SHM (*structural health monitoring*) es un campo de la ingeniería civil con un importante crecimiento dedicado al desarrollo de métodos que proporcionen información sobre cualquier cambio significativo o daño que se produzca en una estructura. Se enfoca en los métodos y técnicas que permiten la detección, localización, cuantificación y predicción de las diferentes escalas del daño de la estructura a partir de cambios en sus características físicas, estáticas y dinámicas, importantes para determinar la vida útil de la estructura. Adicionalmente las técnicas MSE se implementan y se monitorean a la distancia y en tiempo real.

Los puentes son obras de ingeniería de gran trascendencia en la sociedad, que implican un gran inversión y esfuerzo técnico, sin embargo, es importante resaltar que estos poseen una vida útil, es decir, por medio del paso del tiempo presenta deterioros y sumados a la presencia de eventos como sismos, erosiones, socavación, factores ambientales, aumento de la flota vehicular y la carga que circula por las carreteras y fundamentalmente la falta de trabajos de mantenimiento, se ocasionan daños en muchos casos han conllevado incluso al colapso. (Muñoz & Gómez, 2013).

Muchos puentes son reparados o sustituidos de forma rutinaria sin una evaluación cuantitativa de su capacidad real de estado y de soporte de carga. Decidir el destino de un puente sobre la base de la inspección visual y modelado por sí sola, no puede ser considerado como una forma eficiente de manejar la toma de decisiones sobre la seguridad, mantenimiento o sustitución de un puente. (Navarro, 2014). La progresiva aplicación de los sistemas de monitoreo usando sensores de fibra óptica en ingeniería civil tienen muchas y significativas ventajas comparados con los sensores convencionales eléctricos, tales como: utiliza un medio no conductivo, eléctricamente pasivo e inmune a las ondas electromagnéticas, mediciones a través de distancias largas sin pérdida de

precisión de la señal, permite la conexión en serie de múltiples sensores de diferentes tipos en una sola fibra óptica y presenta una vida útil mayor respecto a su contraparte eléctrica. (Lee, 2010).

La presente monografía busca profundizar sobre el monitoreo de la salud estructural de puentes con tipologías que incluyan postensados, voladizos sucesivos, viga tipo cajón, usando sensores de fibra óptica con el propósito de recolectar, procesar, almacenar e integrar información asociada al monitoreo periódico de los mismos, cuya importancia radica en obtener información para poder planear y diseñar actividades de mantenimiento que conlleven a aumentar la confiabilidad y la seguridad de los puentes. Este monitoreo contribuye a prevenir el impacto social, económico, ambiental y estético que pueda presentarse por una falla en la estructura y encontrar soluciones.

Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE] (2019), el sector de la construcción es uno de los sectores de la economía colombiana que ha presentado un crecimiento del 1,8% referentes en carreteras, calles, caminos, puentes, carreteras sobreelevadas, túneles y construcción de subterráneos en el primer trimestre de 2019. Una de las principales obras del sector de la construcción es la infraestructura vial de un país, particularmente los puentes juegan un papel preponderante en el desarrollo económico por la conectividad de regiones, permitiendo disminuir distancias, tiempo de desplazamiento y costos de transporte.

Surge la necesidad de hacer un análisis crítico sobre el estado del monitoreo estructural con sensores de fibra óptica aplicados a puentes a nivel mundial y establecer la línea base de una futura aplicación a los puentes existentes en Colombia, revisar los diferentes escenarios y analizar el panorama jurídico ante la creciente figura contractual de las concesiones de las grandes obras de infraestructura y como lograr integrar el monitoreo estructural como exigencia en su implementación y ser una figura de garantía para el estado colombiano.

Objetivos

Objetivo General

Determinar los diferentes usos de sensores de fibra óptica aplicados al monitoreo estructural de puentes, para la caracterización de las diferentes señales y medición de parámetros como la deformación, temperatura y demás fenómenos físicos que afecten la salud estructural de los puentes.

Objetivos Específicos

Realizar una revisión de la literatura sobre el monitoreo en salud estructural en puentes, con las tipologías más usadas que incluyan postensados, sistemas constructivos de voladizos sucesivos y grandes luces, utilizando sensores de fibra óptica FBG.

Analizar con un enfoque crítico la literatura consultada y diagnosticar su posible aplicación en Colombia

1. Salud estructural

El monitoreo de la salud estructural ofrece una mejor comprensión del comportamiento in situ de la estructura, la detección temprana de daños conlleva a un mejor mantenimiento y optimización de los recursos invertidos para el óptimo comportamiento estructural. El estudio de la literatura técnica revela que a mediados de la década de 1970 las fibras ópticas empezaron a mostrar su potencial para ser utilizadas como sensores (Meggett, 2003). Después de casi tres décadas de investigación de los sensores de fibra óptica FBG (Fiber Bragg Grating), usados en la MSE, están a punto de alcanzar su mayor aplicabilidad cuyo principal objetivo en el desarrollo del monitoreo es perfeccionar los métodos y técnicas para hacer mediciones y monitoreo aplicados a las construcciones civiles, lograr establecer los parámetros y normas que regulen y calibren su aplicación (Majumder, Gangopadhyay, Chakraborty, Dasgupta, & Bhattacharya, 2008).

La creciente conciencia de la importancia de la salud estructural MSE, ha logrado que varias herramientas automatizadas se estén desarrollando en beneficio de la sociedad. El gobierno americano también está implementando reglas estrictas con respecto a los procedimientos y la duración de los ciclos de mantenimiento de estructuras de uso masivo tal como puentes. Esto disminuye las inversiones de capital y también reduce el riesgo debido a accidentes. Estos beneficios de la vigilancia de la salud estructural entre otros pueden ser: detección temprana del riesgo, aumento de la esperanza de vida de la estructura y Rentabilidad. (Alokita, y otros, 2019).

1.1 Monitoreo de la Salud estructural

La salud estructural. Consiste en mantener en valores permisibles algunos parámetros estructurales que dependerán, entre otros factores, de la importancia de la estructura, la

localización, amenazas existentes, los niveles de fatiga, deformación, corrosión, aceleración, esfuerzo, entre otros que son de interés para la seguridad y confiabilidad de la misma. Para saber el estado del puente se opta por el monitoreo de la salud estructural (MSE) (Serov, 2017). El MSE se basa en tecnologías de detección, identificación y caracterización de daño y degradación de las propiedades de las estructuras.

La integración de sensores dentro de la estructura del sistema al ser monitorizado hace posible construir o corregir principalmente nuevos sistemas que optimicen el diseño o funcionalidad. Una de las formas naturales de la innovación y que requiere de mayor investigación en el campo de la MSE está conectado con el desarrollo de tecnologías para el análisis de los indicadores y señales, ya que como resultado del monitoreo se obtienen una serie de datos, los cuales son almacenados para posteriormente ser analizados mediante la automatización para la interpretación de la información y así lograr hacer un análisis del monitoreo, permitiendo de esta forma identificar fallas peligrosas y realizar procedimientos de protocolo y seguridad antes de un evento no deseado.

Los tipos de monitoreo se clasifican en:

- **Monitoreo continuo o en línea.** Se instalan instrumentos “durante un cierto período de tiempo e inclusive a lo largo de la vida útil de la estructura” (Unidad de Puentes, 2013, pág. 57).
- **Monitoreo fuera de línea.** Se realiza un “diagnóstico del estado del puente y detección de daños mediante pruebas de carga dinámica o estática, que puede realizarse como parte de las inspecciones de rutina o programadas en forma periódica” (Unidad de Puentes, 2013, pág. 57).

1.1.1 El objetivo principal del monitoreo estructural. Es poder observar e identificar los cambios que se presentan en una estructura para conocer si estos representan riesgos potenciales

para la salud estructural del puente para proceder a dar una solución oportuna que brinde confiabilidad y seguridad a la integridad humana.

El monitoreo de la salud estructural en puentes de hormigón puede llevarse a cabo utilizando métodos destructivos y no destructivos. Técnicas destructivas. Tales como análisis químicos, requieren extracción de muestras y preparación. Estos requieren de tiempo, son costosos, y proporcionan resultados sólo después de la investigación de laboratorio (Taheri, 2019). Sin embargo, las técnicas no destructivas (NDT), incluyendo la prueba de rebote martillo, emisión acústica y la inspección ultrasónica, entre otras, son más económicas, y puede proporcionar resultados sin la necesidad de extracción de muestras. Sin embargo, la mayoría de las técnicas destructivas y no destructivas no proporcionan datos de vigilancia de la salud estructural MSE continuos que requieren el uso de sensores inteligentes para ayudar a resolver este problema (Maierhofer, y otros, 2006).

Los sistemas de monitoreo de salud estructural (MSE) se pueden instalar de forma permanente y son capaces de arrojar diagnósticos en forma continua y sistemática, el seguimiento y la evaluación de las condiciones estructurales y ambientales de los puentes (Taheri, 2019). Estas variables se utilizan para determinar los parámetros de desempeño estructural para determinar el estado de salud o el rendimiento del puente. Este proceso eventualmente puede ayudar a establecer un proceso racional de toma de decisiones para optimizar las decisiones de mantenimiento y prevención de la insuficiencia de la estructura en nuestro caso puentes con excesivas fallas estructurales (Abdel-Jaber & Glisic, 2016).

El monitoreo de la salud estructural de puentes de hormigón hace referencia al proceso de implementación de un diagnóstico de daños y estrategia de identificación (Sohn, Farrar, Hemez, & Czarnecki, 2004). En la figura (1) se muestra los diferentes niveles para el diagnóstico de la

salud estructural, que son importantes en el mantenimiento de las estructuras para poder realizar operaciones de reparación evitando daños graves, accidentes, y permitiendo economizar recursos.

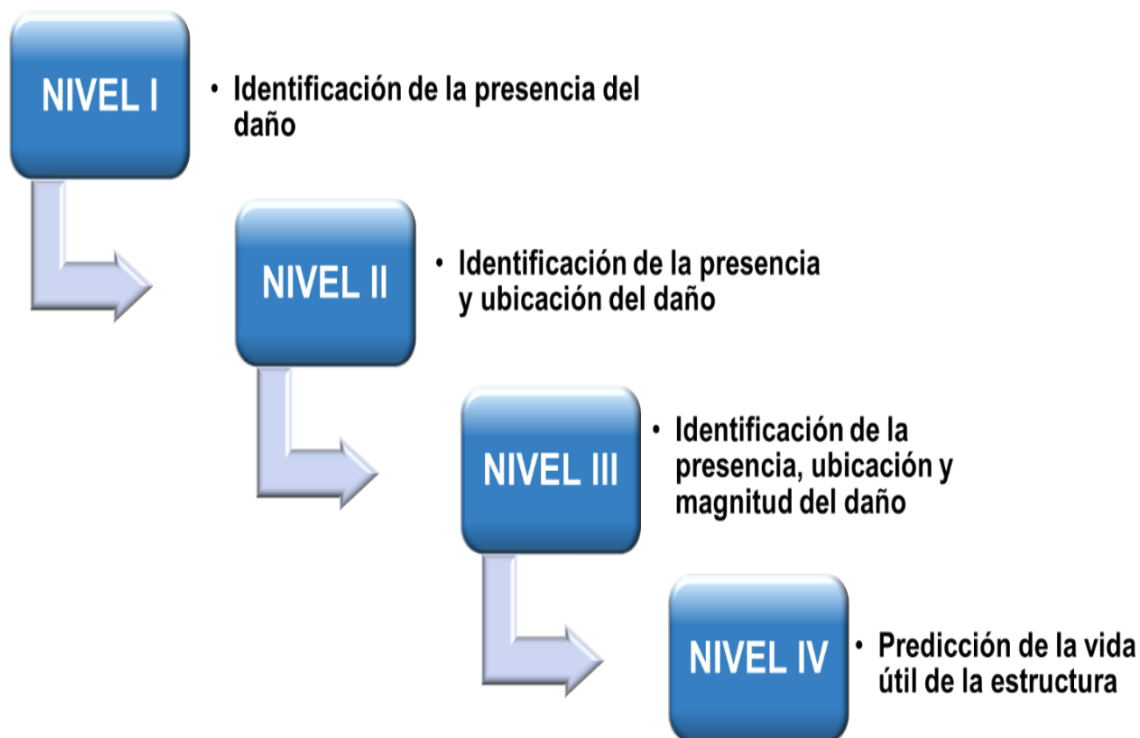


Figura 1. Niveles de las técnicas de monitoreo de salud estructural según su alcance. Adaptado Marulanda, Thomson y Marulanda (2011).

1.1.2 El monitoreo como estrategia de gestión. Es importante para un óptimo seguimiento y control del estado de los puentes aplicar los cuatro niveles en la detección de daños (ver tabla 1), que sirve de apoyo en la toma de decisiones que conlleva a: (1) determinar el estado de conservación de los puentes, (2) la presencia y localización de daños o irregularidades estructurales, (3) la cuantificación de sus efectos en el comportamiento y desempeño de la estructura, (4) la necesidad de una pronta intervención de mantenimiento.

Tabla 1.*Monitoreo estructural y niveles de detección de daños*

Niveles	Preguntas
Nivel 1. Detección:	¿está dañada la estructura?
Nivel 2. Localización:	¿dónde se ubica el área con daño?
Nivel 3. Cuantificación:	¿cuál es la severidad del daño?
Nivel 4. Predicción:	¿cuál sería la vida útil remanente para la estructura? o ¿cuál sería su desempeño ante la ocurrencia de un posible evento?

Nota: Adaptado de Rytter, A. (1993).

Los métodos de monitoreo de integridad estructural pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- ❖ **Métodos globales:** Determinan la presencia y la localización de un daño a partir de la dinámica de la estructura.
- ❖ **Métodos locales:** Constituidos por pruebas experimentales e inspecciones visuales, tales como métodos de ultrasonido, métodos de campos magnéticos, entre otros. En estos métodos es necesario conocer a priori de la localización del daño.

Los métodos de monitoreo permiten detectar, localizar y cuantificar el daño en las estructuras, simplifican los procedimientos de inspección de daños. Mediante la aplicación de los métodos globales y locales en la gestión del monitoreo en estructural en puentes, así mismo la aplicación de los niveles de detección de daños (Rytter, 1993). En la figura 2 se muestra el mecanismo de gestión de la infraestructura de puentes aplicado al monitoreo estructural.

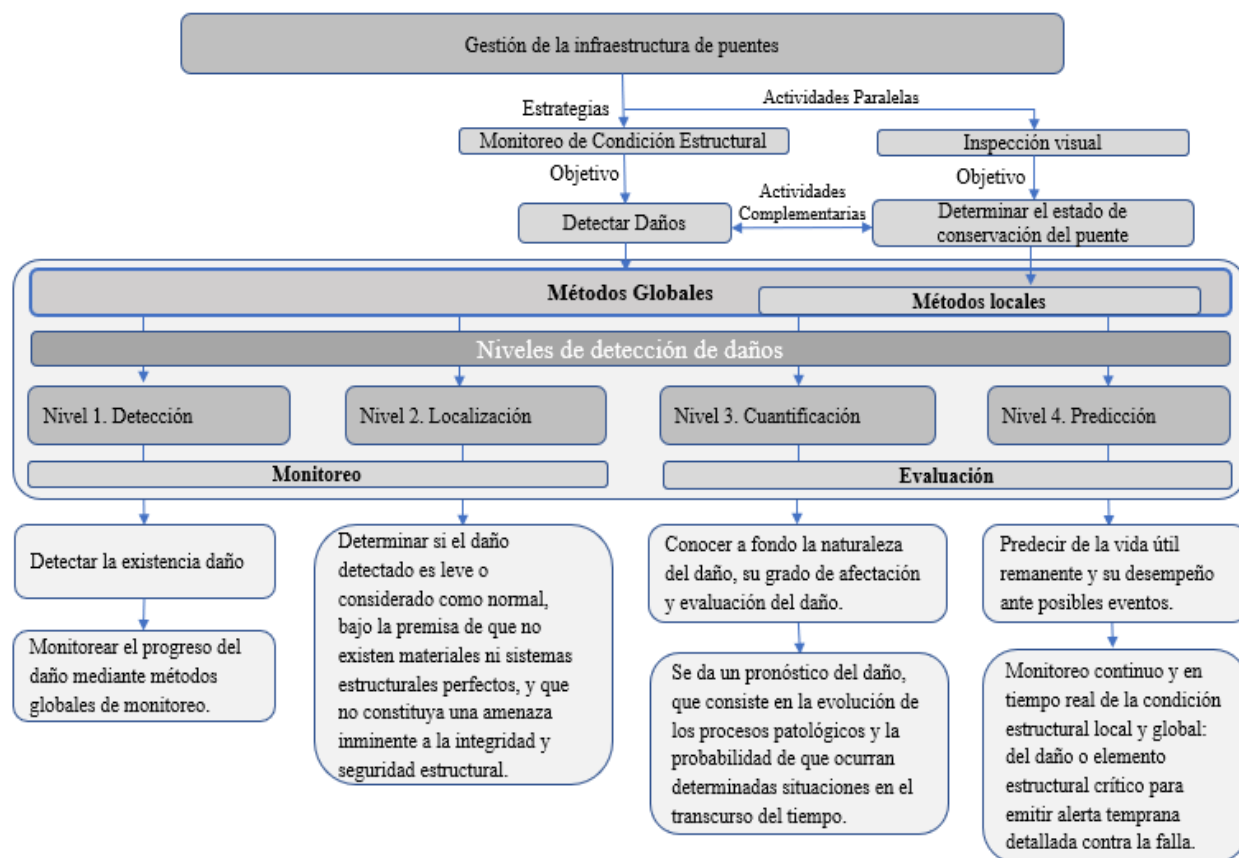


Figura 2. Elaboración propia de la gestión en el monitoreo de la Salud estructural. Adaptado de Lui-Kuan y Agüero. (2017), Balageas, Fritzen y Güemes (2006).

Cuando se requiere detectar y localizar un daño en una estructura y sobre el cómo hacerlo, es común que lo primero que debe hacerse es una inspección visual. Es decir, realizar un desplazamiento hasta la zona afectada para verificar los posibles daños o hallazgos con algún tipo de prueba, por ejemplo, se procede a tocar el área afectada, o mediante el empleo de un equipo para el MSE que consiste en sensores o transductores, acondicionadores de señal que son dispositivos para adquisición de datos incluido el software para la interpretación de dichos datos (Balageas, Fritzen, & Güemes, 2006). Los transductores más usados en este proceso son: acelerómetros, extensómetros, termocuplas, detectores de resistencia, temperatura, transformadores lineales de voltaje, desplazamiento y detectores de corrosión, etc.

Por lo general, se instalan los transductores en la estructura de los puentes y estos transmiten las señales por radio, microondas, línea telefónica o fibra óptica, hasta una central donde se realiza la interpretación de los datos, y se almacenan para su posterior análisis (Federicia, y otros, 2014). Es posible automatizar la interpretación de los datos y realizar un monitoreo en tiempo real que permite identificar fallas peligrosas y evacuar edificaciones o cerrar puentes antes de un colapso.

Calavera (1996) menciona que a través del tiempo ha existido un gran interés en conocer cuál de las diversas fases en que se divide la vida útil de una estructura hay más concentración de fallas y siniestralidad en la construcción, además la distribución de fallas según el material estructural usado. La compañía de seguros Bureau Securitas (1996) realizó una clasificación de las diversas fallas presentadas en los siniestros registrados por diferentes compañías aseguradoras a obras de ingeniería civil. En total se analizaron 10.000 casos sobre los diferentes materiales estructurales utilizados, determinando el material con mayor número de problemas asociados (Calavera, 1996). La tabla 2 muestra la distribución de falla según el material empleado en la construcción.

Tabla 2.

Distribución de fallas según material estructural empleado

Material	Porcentaje
Hormigón armado	86%
Estructuras metálicas	7%
Estructuras mixtas	7%

Nota. Elaboración propia. Adaptado de Calavera (1996).

Según este estudio, el hormigón armado es el material que más fallas presenta en el proceso constructivo con un 86%, mientras que la construcción metálica 7% y estructura mixta, 7%.

La tabla 3 muestra la distribución de fallas que tienen lugar según las etapas del proyecto constructivo (Bureau Securitas, 1996).

Tabla 3.

Distribución de fallas según la etapa del proyecto.

Etapas del proyecto constructivo	Porcentaje
Prediseño y diseños	43%
Ejecución	43%
Materiales	6%
Uso y mantenimiento	8%

Nota. Elaboración propia. Adaptado de Calavera (1996)

La etapa de diseños y construcción son las etapas constructivas que mayor distribución de falla presenta con un 43% respectivamente de peso porcentual de los casos analizados, finalmente la tabla 4 muestra la distribución de falla según la edad y tiempo de construcción.

Tabla 4.

Distribución de fallas según la edad de las construcciones

Edad de las construcciones	Porcentaje
En construcción	31%
Mayor a 10 años	31%
Entre 5 y 10 años	8%
Entre 2 y 5 años	10%
Menos de 2 años	20%

Nota. Elaboración propia. Adaptado de Calavera (1996)

Entre las mediciones realizadas se recopilaron los datos referentes a las fallas según la edad de las construcciones. La mayor concentración de falla se presenta en la etapa de la construcción con un 31% peso porcentual y en construcciones con edades superiores a 10 años, también con 31%.

Es importante anotar que el 20% de las construcciones con menos de dos años de construidas presentaron falla. Este porcentaje no puede despreciarse considerando que en Colombia los plazos de garantía se establecen dependiendo del defecto de construcción y serán de 1 a 10 años (Ley N°38, 1999). Así, sumado el hecho que no se tiene certeza sobre la vida útil de una estructura, la necesidad del monitoreo estructural al poco tiempo de finalizada la construcción, es garantía para el constructor y el contratante, ya que las ventajas de un sistema de monitoreo que informe en tiempo real el estado de la estructura principalmente durante la fase de construcción y durante los primeros años de uso garantizaría control, seguimiento y un óptimo funcionamiento.

2. Los sistemas de monitoreo de salud estructural

Los sistemas de monitoreo de salud estructural proporcionan información confiable y actualizada sobre las condiciones reales de una estructura, poder hacer seguimiento a su evolución y detectar la aparición de daños. Esto se logra mediante la instalación permanente de una serie de sensores que hagan una medición continua de parámetros relevantes para las condiciones estructurales de los puentes (Glisic & Inaudi, 2007).

El monitoreo instrumental es una nueva herramienta de seguridad y administración que complementa idealmente los métodos tradicionales, como la inspección visual y el modelado. El monitoreo incluso permite una mejor planificación de las actividades de inspección y mantenimiento, pasando de las intervenciones programadas a la inspección y mantenimiento preventivo y correctivo (Sunaryo, Okamoto, & Inaudi, 2004).

Cada proyecto de monitoreo estructural de puentes presenta sus particularidades y, aunque es posible estandarizar la mayoría de los elementos de un sistema de monitoreo, cada aplicación es única en la forma en que se combinan y se instrumenta (Inaudi, 2009). Sin embargo, es posible clasificar los componentes de monitoreo (ver figura 3), donde se relacionan los sistemas de monitoreo más utilizados en el MSE.

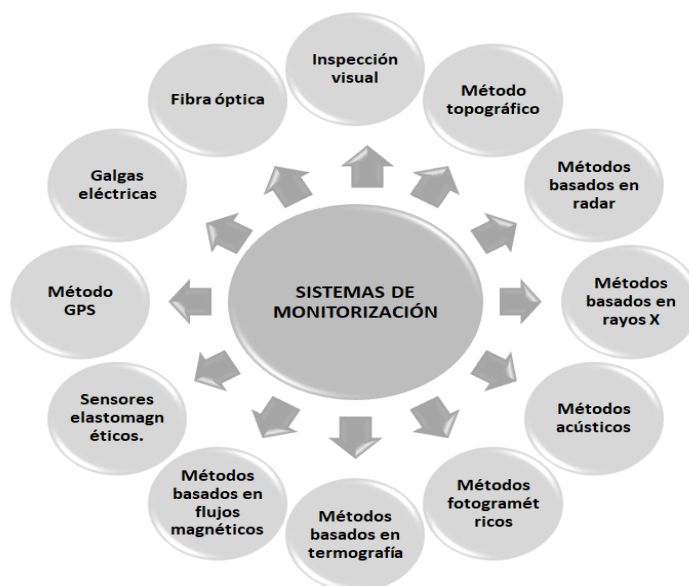


Figura 3. Principales técnicas de monitorización. Adaptado de Torres (2012).

Los métodos actuales para la evaluación manual de una estructura a intervalos de tiempo fijos pueden ser costosos y requieren mucho trabajo. Los avances en las tecnologías de sensores, comunicaciones inalámbricas, las técnicas de procesamiento de datos, y la inteligencia artificial, en conjunción con el mayor número de estructuras envejeciendo más la presión para reducir al mínimo los costos de mantenimiento, han llevado al desarrollo de técnicas más asequibles en costos y más fiables en la información (Hobbs, 2001).

Las principales aplicaciones que se pueden llevar a cabo con las distintas técnicas de monitoreo son:

- Inspección visual. Inspección en su aplicación abarca los problemas de tipo estructural que implican grandes daños o deformaciones, principalmente en aspectos patológicos avanzados.
- Los métodos topográficos. Abarcan las deformaciones de gran escala, principalmente relacionados a la superficie.

- Los métodos basados en radar. Hacen referencia a la detección de distancias por radio, utilizando ondas electromagnéticas para medir parámetros de distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos que abarcan la fisuración, exploración de anclajes, localización de armaduras, instalaciones enterradas y cimentaciones.

- Los métodos basados en rayos X. Se basan en la radiación electromagnética para la localización de diámetro y distribución de diversidad de armaduras, inspección de cables de pretensado, fisuración y homogeneidad del hormigón

- Los métodos acústicos. Utilizan las ondas mecánicas que se propagan a través de la materia, se aplican a la fisuración, exploración de anclajes, localización de armaduras, detección de objetos en el suelo, instalaciones enterradas y cimentaciones.

- Los métodos fotogramétricos. Se encargan de estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto utilizando medidas hechas sobre fotografías. Se aplica para el análisis de desplazamientos, deformaciones y aberturas de fisuras.

- Métodos basados en termografía. Es una técnica de ensayo no destructiva (END) que obtiene la temperatura de la superficie de una estructura a través de la captación de la radiación infrarroja que ésta emite, cuando el flujo de calor en un material es alterado por la presencia de fallas, anomalías o defectos provoca contrastes de temperatura en su superficie.

- Métodos basados en flujos magnéticos. Medida de la cantidad de magnetismo utilizado en el estado de las armaduras en una estructura de hormigón armado y, en general, de aquellos materiales que puedan ser magnetizados, como el caso del acero.

- **Método basado en sensores elastomagnéticos.** Se basa en la fuerza en elementos lineales metálicos. Utilizado para ver el estado tensional de los tendones postensados, bien en su conjunto, bien en una parte concreta de éstos.

- **Método GPS.** Es un sistema que permite determinar la posición de objeto con una precisión de hasta centímetros, aunque lo habitual son unos pocos metros de precisión.

- **Método de Galgas eléctricas.** Es un sensor que mide la deformación, presión, carga, par, posición, etc.

- **Método de fibra Óptica.** Se utilizan como un medio para transmitir luz entre dos puntas de una fibra. Tienen un amplio uso en las comunicaciones por fibra óptica, donde permiten la transmisión en distancias y en un ancho de banda para mayor velocidad de datos.

2.1 Técnicas aplicadas en monitoreo de la salud estructural (MSE) de puentes

Diseñar e implementar un sistema de SME efectivo es un proceso que debe llevarse a cabo siguiendo una secuencia lógica de pasos y decisiones de análisis. Con frecuencia, los sistemas SME se han instalado sin un análisis real de las necesidades de la estructura, estos sistemas de monitoreo, aunque funcionan perfectamente desde un punto de vista técnico, a menudo proporcionan datos que son difíciles de analizar o que los interesados del proyecto no pueden utilizar para respaldar las decisiones de gestión (Inaudi, 2009). En la figura 4 se enumeran 7 pasos generales que responden a las necesidades de todas las partes involucradas en el diseño e implementación de un sistema adecuado de monitoreo estructural que conllevan a excelentes resultados y acertadas interpretaciones de las señales emitidas de los sensores usados en el monitoreo.

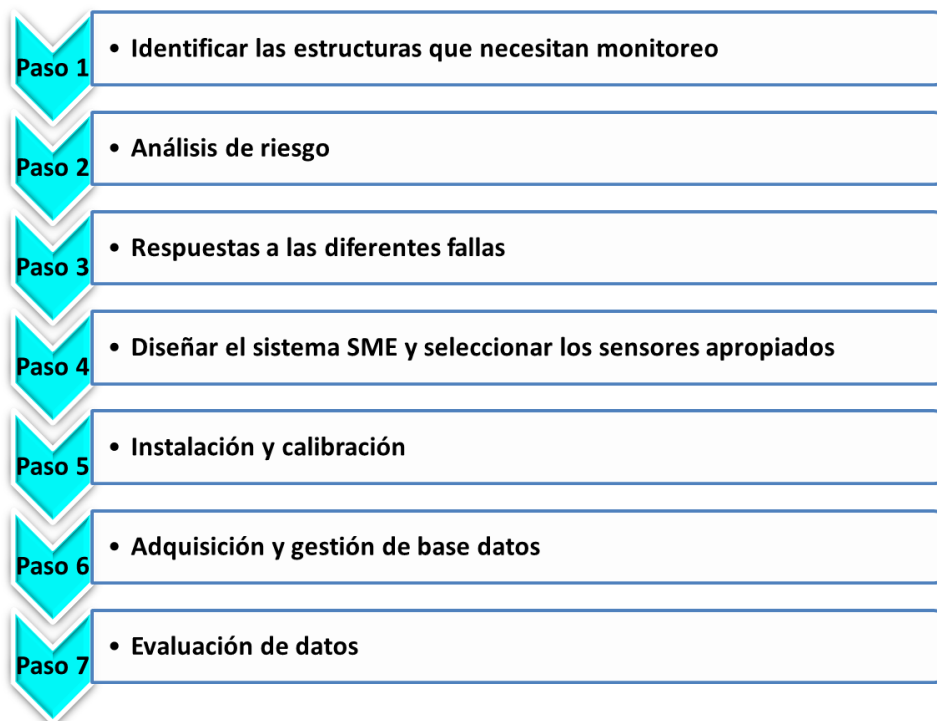


Figura 4. Pasos secuenciales para una óptima implementación de monitoreo estructural. Adaptado de Inaudi (2009).

El objetivo de esta sección es hacer una breve descripción de las tecnologías disponibles para monitorear cinco parámetros importantes en los puentes de hormigón tal como: temperatura, humedad, tasa de corrosión, deformación, esfuerzos y grietas. Estos parámetros fueron elegidos ya que juegan un papel importante en la seguridad estructural, así como la durabilidad, sostenibilidad y fortaleza a largo plazo de los puentes (Taheri, 2019). Se nombran las técnicas más usadas en el estudio de dichos parámetros. Hay 6 tipos de sensores más comunes usados para el monitoreo de la salud estructural de puente (ver figura 5). Se hará una descripción de cada uno, con énfasis en los sensores de rejilla bragg, en un capítulo posterior se hará un análisis completo de las ventajas y desventajas de los sensores de fibras ópticas su fundamentación y aplicación.

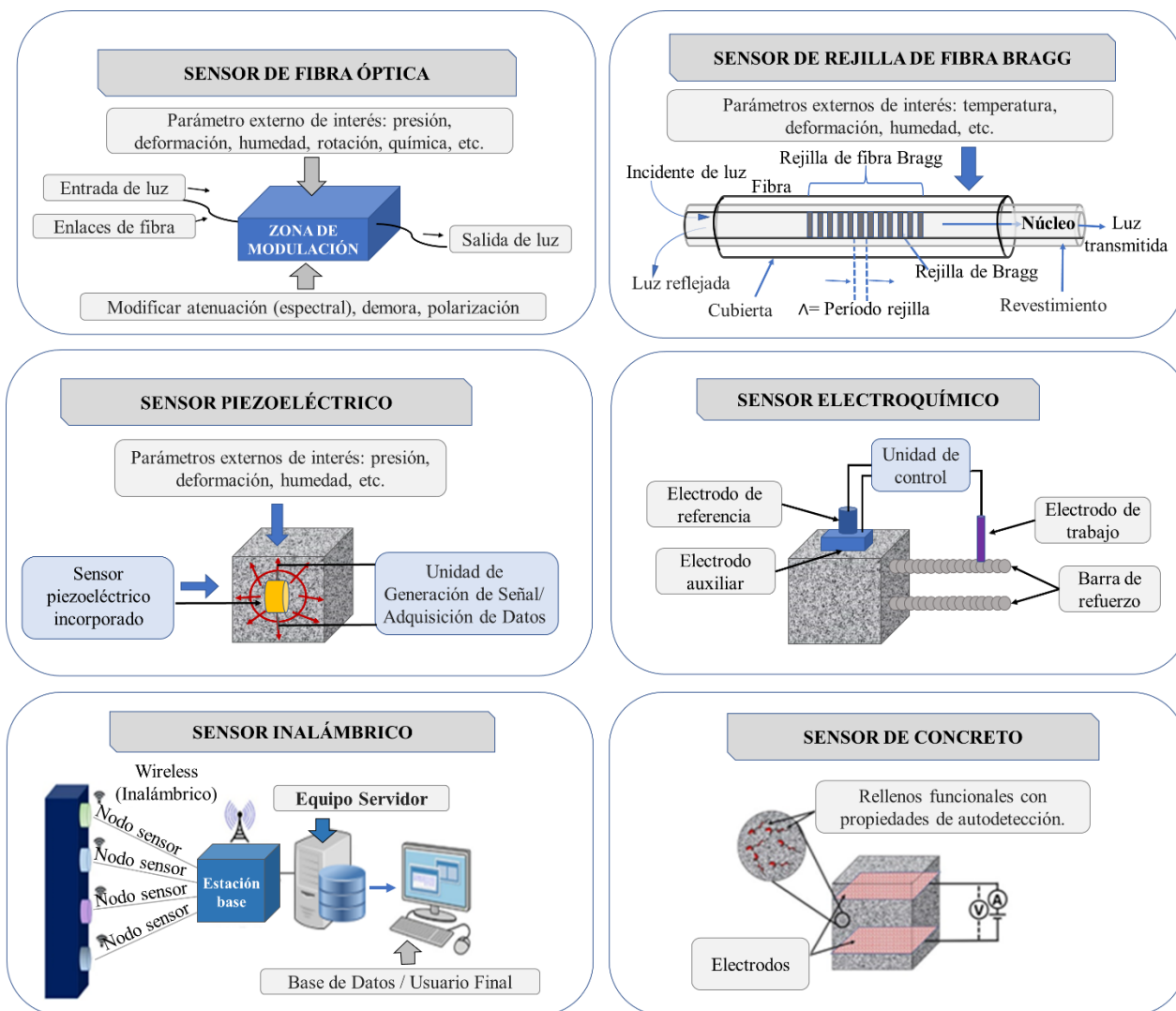


Figura 5. Muestra (a) sensor de fibra óptica, (b) de fibra Bragg grating sensor, (c) sensor piezoeléctrico, (d) sensor electroquímico, (e) sistema de sensor inalámbrico, y (f) Sensores de monitoreo de tensión y grietas de hormigón. Adaptado de Taheri, S. (2019).

2.2 Sensor de rejilla de fibra bragg

Las rejillas Bragg son sensores que se caracteriza porque en su núcleo se grana una serie de franjas que se conocen como rejillas (ver figura 6), el cual permite que el índice de refracción del núcleo no sea constante, sino que presenta una modulación que varíe periódicamente en la dirección

longitudinal de la fibra. Refleja un pico espectral muy angosto de la luz y es guiado por la fibra (ver figura 7).

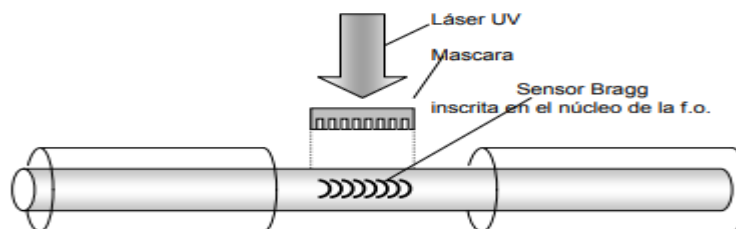


Figura 6. Sensor de Bragg en el núcleo de una fibra mediante un láser de UV y una máscara. Adaptado de Frövel (2006).

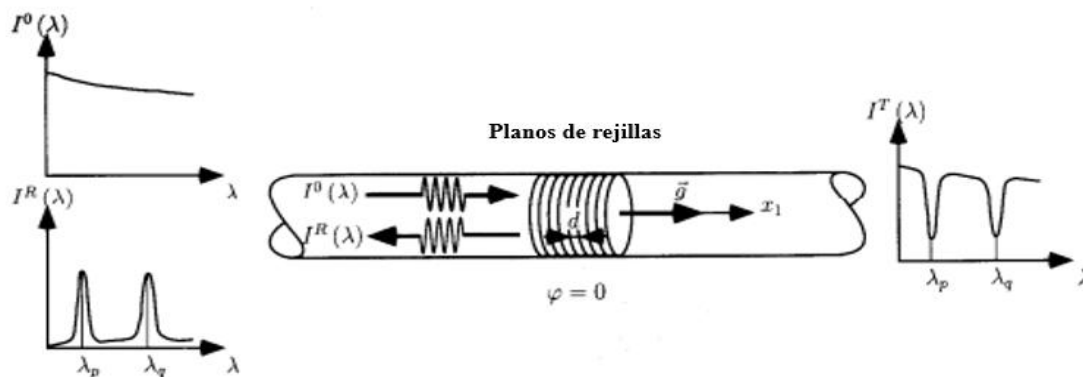


Figura 7. Representación esquemática de la reflexión de una frecuencia determinada de la luz viajando en la fibra óptica en una red de Bragg. Adaptado de Frövel (2006).

Los sistemas de fibra óptica que se encargan de modular la longitud de la onda de luz son los llamados “Sensores de Fibras con Rejilla de Bragg”. Son sensores que fueron desarrollados con el propósito de realizar tratamiento de señales ópticas como filtros, sin embargo, se descubrió que estos sensores tenían un gran potencial para la medición de deformaciones y temperaturas. Se caracterizan por tener un filtro selectivo de longitud de onda de luz y reflejar solo la parte del espectro de luz respecto a la reflectividad máxima de la rejilla bragg.

Cuando la rejilla se deforma axialmente, la longitud de onda de la reflectividad máxima cambia y genera un desplazamiento del espectro de luz reflejado en cuanto a su longitud de onda (Garita,

2016). Entre las variables que usualmente monitorean los sensores en MSE se encuentran: carga sobre la estructura, deformación, temperatura, aceleración y vibraciones. Quizás los sensores más comunes en MSE son los de fibra óptica, pues presentan ventajas específicas tales como: son no conductivos, presentan inmunidad a la interferencia electromagnética y frecuencias de radio, son flexibles y son estables.

Estos sensores poseen un gran factor diferenciador y ventajoso sobre los sensores eléctricos ya que los eléctricos deben ser calibrados y balanceados antes de cada uso. Los FBG proporcionan valores absolutos de deformación, los cuales no varían con el paso del tiempo, los elementos que si presentan variaciones son los materiales y campo de fuerzas residuales alrededor del sensor. Por medio de la utilización de un analizador óptico de espectros y una fuente de luz de banda ancha que se encarga de iluminar la fibra óptica con el sensor o con dispositivos automatizados, se puede detectar el corrimiento del pico.

La longitud de onda cambia de forma lineal con la variación de la temperatura, por lo cual la deformación debe corregirse por temperatura, por medio de calibración, combinación de sensores o con sensores de compensación de temperatura. Estas rejillas tienen una propiedad selectiva que permite una conexión en serie de múltiples rejillas con diversas reflectividades en una misma dirección o ruta (ver figura 8), permitiendo de esta forma realizar una multiplexación (combinación de dos o más señales y transmisión por un solo medio) por división de longitud de onda.

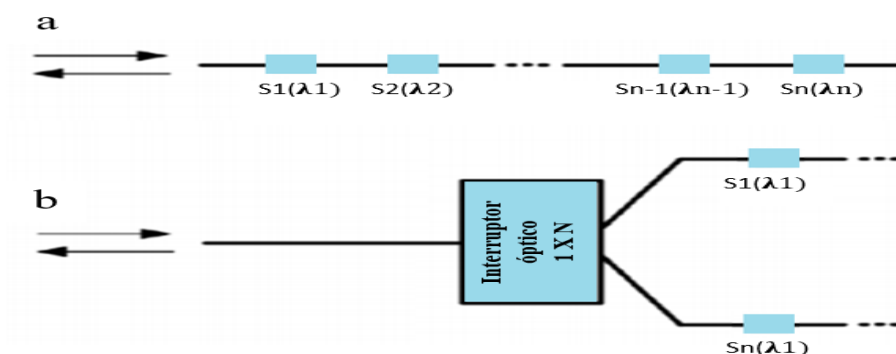


Figura 8. La multiplexación por división de longitud de onda. Adoptado de Frövel (2006).

La figura 9 muestra el pico de la red desplazado en la longitud de onda por causa de una deformación estructural, esta propiedad permite que, sin importar el modo de instalación del sensor, ya sea fijada externamente sobre la sección o embebida en el hormigón, este sensor seguirá monitoreando las deformaciones.

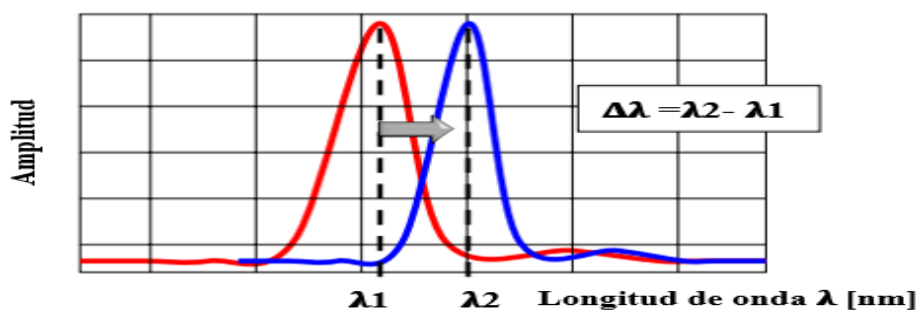


Figura 9. Representación esquemática del espectro típico de una red de Bragg. Tomado de Frövel (2006).

2.3 Técnicas de evaluación de corrosión

Para la evaluación de la corrosión se usa una técnica llamada técnica de potencial semicelda (ver figura 10) la corrosión del acero en el hormigón se produce a través de reacciones electroquímicas. Por lo tanto, las técnicas electroquímicas son ideales para el estudio de los procesos de corrosión (Poursaee, 2014).

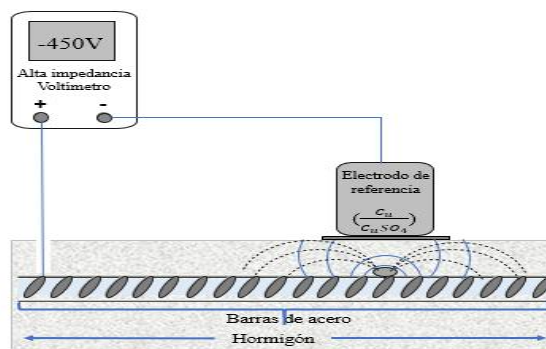


Figura 10. Instrumentación para el método potencial semiceldas descrito en la norma ASTM C876. Adaptado de Poursaee, (2014). 13

La técnica de potencial semicelda es la más utilizada para evaluar la corrosión de las barras de refuerzo de acero en el hormigón. Esta técnica se basa en medir el potencial electroquímico de la barra de refuerzo de acero con respecto a un electrodo estándar de referencia (electrodo de cobre/sulfato de cobre -CSE) este electrodo es el recomendado por la ASTM-C876, es colocado sobre la superficie del hormigón, y puede proporcionar una indicación del riesgo de corrosión del acero.

De acuerdo con la Norma ASTM C876 se toma como interpretación de los resultados, si el potencial medido es más negativo que -350 mV (milivoltios), la probabilidad de corrosión activa es más de 90%. Si el potencial medido es más positivo que -200 mV, la probabilidad de no tener corrosión activa es del 90%, y entre -200 y -350 mV es la región de incertidumbre (Poursaee, 2014).

2.4 Técnica de monitoreo con sensores de emisión acústica (AE)

El monitoreo de emisión acústica (EA) es una técnica de vigilancia pasiva dirigida a detectar ondas de tensión acústicas generadas en los materiales que surgen de la rápida liberación de energía de

deformación de los cambios microestructurales en un material (Meo, 2014). La mayoría de los sensores tradicionales EA constan de un dispositivo piezoeléctrico hechos de plomo zirconato titanato (PZT) que transforma el movimiento producido por una onda elástica en una señal eléctrica.

En 2009 se encontró una gran grieta en un elemento fundamental de la fractura en el puente de San Francisco-Oakland Bay por una inspección visual en el lugar (ver figura 11). Un sistema de supervisión (EA) fue aplicado a través de las pruebas de laboratorio para el control continuo con el fin de detectar y localizar la iniciación de grietas (ver figura 12) y el crecimiento en tiempo real. Este estudio muestra que la grieta por fatiga iniciadas en un elemento estructural bajo la carga de fatiga se logró detectar con éxito, además de ser monitoreada, con unos pocos sensores (Poursaee, 2014).



Figura 11. Puente de San Francisco Oakland Bay, monitoreo acústico de grietas. Adaptado de Poursaee (2014).

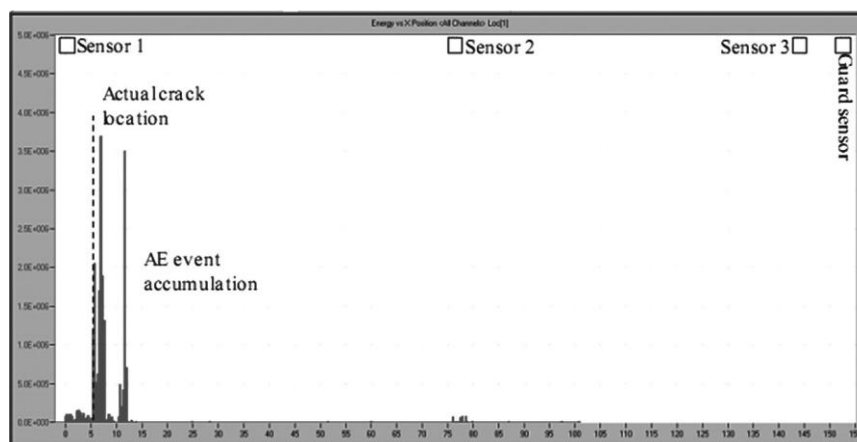


Figura 12. Energía vs posición x grieta en condiciones de carga de fatiga. Adoptado de Poursaee (2014).

2.5 Técnica de monitoreo con sensores electromagnéticos

Las tecnologías de vigilancia y monitoreo con sensores electromagnéticos permiten inspeccionar estructuras de acero o metálicas, evaluar las condiciones de salud estructural y las posibles deformaciones de sus elementos constitutivos. La figura 13 muestra un sistema sensorial portátil electromagnético en forma de U que se puede utilizar para la inspección de grietas en los cables de acero (Wang, 2014).

A continuación, se describen las aplicaciones más usuales de este tipo de monitoreo.

1. *Caracterización microestructural utilizando el método magnético:* Las características de la microestructura, como el contenido de las fases no ferromagnéticas, las cantidades relativas de las diferentes fases, pueden afectar o acelerar la degradación de la microestructura del acero, teniendo una incidencia directa en la fatiga de los aceros soldados, generando así falla y ruptura en los mismos, esto puede determinarse a través de medición magnética (Wang & Wang, 2014).

2. *Inspección Geométrica estructural utilizando el método magnético:* Las grietas y el tratamiento térmico de soldadura pueden ser detectados por el método de inspección de polvo magnético. En este método, la discontinuidad de bucles magnéticos puede identificar anomalías estructurales (Wang & Wang, 2014).

3. *Anomalia de inspección a través de la señal magnética:* La variación de la microestructura se puede supervisar a través de la corriente inducida por campo magnético. Este enfoque ha sido utilizado en la detección de fallas metalúrgicas en componentes tales como fracturas causadas por corrosión bajo tensión (Zhanpeng & Wu, 2008).

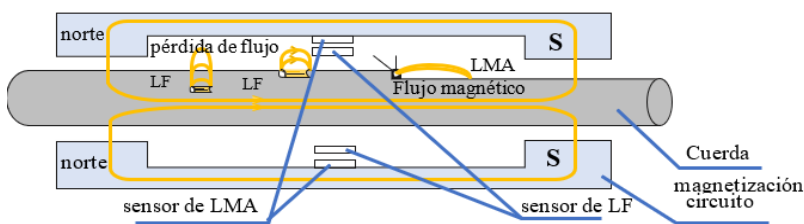


Figura 13. Sensores magnéticos para indicar varias clases de defectos en las cuerdas de acero
Adaptado de Wang y Wang (2014).

2.6 Técnica de monitoreo con sensores inalámbricos

La tecnología inalámbrica elimina la necesidad de un amplio cableado entre los sensores y el sistema de adquisición de datos, por lo tanto, tienen menores costos de instalación y permiten configuraciones de sistemas flexibles. La principal diferencia entre redes de sensores inalámbricas y redes de sensores con cable es el medio sobre el cual los datos de los sensores se comunican al receptor de datos del sitio monitoreado. Estos sensores son una red inalámbrica en donde todos los

nodos comparten un espectro de frecuencias de los datos. En contraste con las redes de cable, cada nodo tiene un enlace directo con red inalámbrica de sensores, ver figura 14, (Kane, Peckens, & Lynch, 2014).

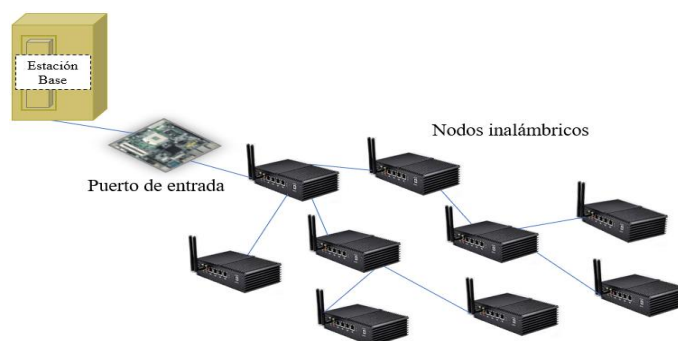


Figura 14. Red inalámbrica de sensores. Adaptado de Fernández, Meré, de Pisón, González, Alba, Lostado & Pernía (2009).

Las redes de comunicación hacen referencia a una red de nodos en la que no hay un nodo central, sino que todos los nodos están en igualdad de condiciones, en donde, pueden realizar una serie de mediciones sobre la estructura, transformar la señales a datos en digital dentro del nodo y transmitirla fuera de la red de sensores vía al elemento procesador en una estación base, donde la información es almacenada para realizar análisis de datos. En una red de sensores inalámbricos incluye nodos inalámbricos, puertas de enlace, estaciones base (Fernández, y otros, 2009).

2.7 Técnica de monitoreo con sensores piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos pueden transformar la energía eléctrica en energía mecánica y energía mecánica en energía eléctrica. Estos materiales funcionan como sensores, actuadores, aceleradores, y transductores. Por ejemplo, los daños estructurales tales como dislocación, aparición o propagación de grietas generan ondas de tensión a través de la liberación repentina de

la energía que se puede detectar usando sensores piezoeléctricos (Yuyama, Ohtsu, & Kishi, 2000). Entre los materiales piezoeléctricos se encuentran las cerámicas, polímeros, y materiales compuestos, tienen propiedades mecánicas muy estables, soportan temperaturas de hasta 350°C, sin perder su capacidad de conversión entre energía eléctrica y energía mecánica (Wen, Quan, & Ser, 2010), (Giurgiutiu, 2005).

Existen materiales naturales, tales como cuarzo y sal de Rochelle, estos materiales han sido ampliamente utilizados como componentes constitutivos de los transductores piezoeléctricos. El cuarzo ha sido el material más favorable para medición de la presión debido a su alta resistencia mecánica de 2-3 GPa, la sensibilidad de alta tensión, y resistencia térmica de hasta 400°C. Sin embargo, su aplicación es limitada en temperaturas húmedas (An, Kim, & Sohn, 2014)(An & Kim, 2014)(An & Kim, 2014). En la figura 15 a, se puede apreciar una muestra de cuarzo en su estado natural y en la figura 15 b, cerámicas piezoeléctricas.

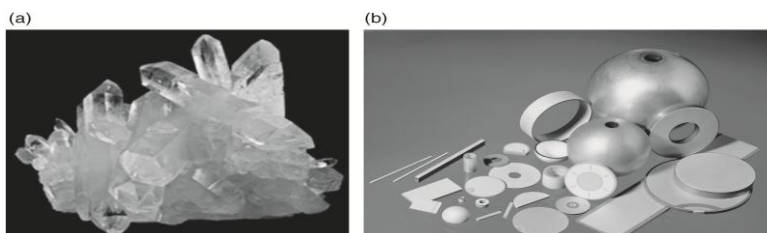


Figura 15. Los materiales piezoeléctricos. Adoptado de An, Kim y Sohn (2014).

Los materiales cerámicos piezoeléctricos (zirconato de plomo titanato o ZPT) con banda ancha son los transductores electromecánicos más requeridos para las detecciones de daño local (Roa-Rodríguez, 2015). Las propiedades de ZPT pueden clasificarse ya sea como blando o duro:

- Materiales ZPT blandos son candidatos ideales para sensores.

- Materiales ZPT duros son adecuados para aplicaciones de alta potencia y transductores ultrasónicos.

El uso de sensores piezoeléctricos y “parches inteligentes” para el monitoreo de la salud estructural han sido aceptados para seguimiento y la rehabilitación estructural, así como en el análisis de la amortiguación de vibraciones (Wen, Quan, & Ser, 2010). El monitoreo con sensores piezoeléctricos no son adecuados para ambientes húmedos, la influencia de la temperatura sobre las propiedades piezoeléctricas, limita sus propiedades conductivas, como el coeficiente de acoplamiento electromecánico, la impedancia acústica, la degradación gradual de las propiedades electromecánicas de un transductor ZPT, y la influencia de la capa de unión entre un parche de ZPT y una estructura de hormigón (Taheri, 2019). La figura 16, ilustra la técnica de monitoreo piezoeléctrico con sensores PZT para la detección de grietas.

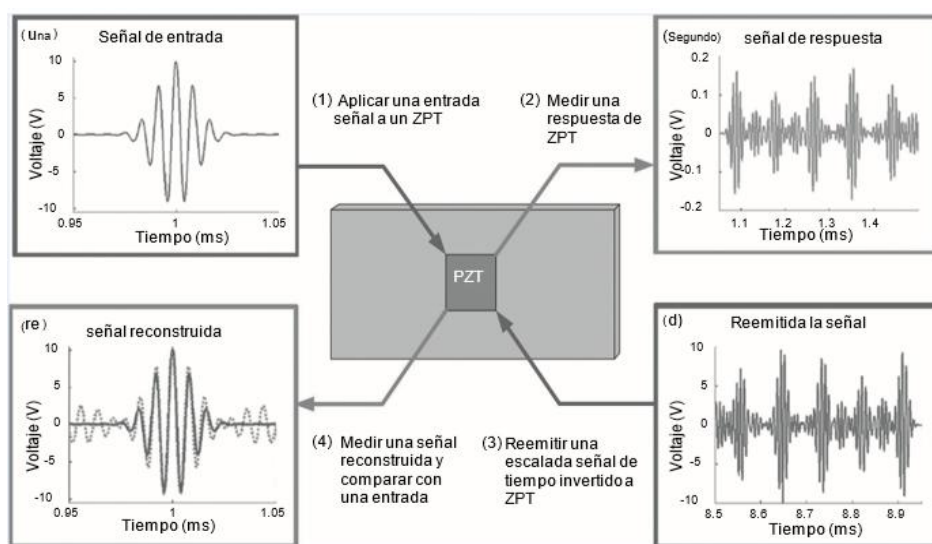


Figura 16. Transductor piezoeléctrico. Adoptado de An, Kim y Sohn (2014), (Lee & Sohn, 2010)

3. Fibra óptica

Las fibras ópticas han generado una creciente confianza entre las tecnologías de monitoreo estructural, son consideradas versátiles y exactas para monitorear parámetros en los puentes de hormigón tal como: temperatura, humedad, tasa de corrosión, deformación longitudinal, deformación estática y dinámica, esfuerzos y grietas. Estos parámetros son unos de los más estudiados en el monitoreo de puentes, ya que juegan un papel importante en la seguridad estructural, así como la durabilidad, sostenibilidad y resistencia a largo plazo (Taheri, 2019).

La fibra óptica es un medio de transmisión de datos por medio de ondas o pulsos de luz, los cuales representan los datos que viajan a través de un filamento transparente, generalmente de vidrio, que son introducidos por un láser o un LED (Malacara, 2015). Es decir “la luz se puede conducir a través de un cilindro dieléctrico transparente, usando el fenómeno de reflexión total interna y con base en múltiples reflexiones [...]” (pág. 49) (Malacara, 2015). El proceso de transmisión implica crear la señal óptica con un transmisor, posteriormente se envía la información a lo largo de la fibra y finalmente se realiza una recepción de la señal, lo que implica convertir esta en una señal eléctrica. Es muy utilizada en la ingeniería de las telecomunicaciones sustituyendo los cables de cobre, considerando que permiten una transmisión en distancias y en un ancho de banda más grande, adicionalmente las señales viajan sin interferencia electromagnética.

La fibra óptica es resistente a la exposición y a las perturbaciones externas o deformaciones, tales como: estiramiento o plegado (Taheri, 2019). Los sensores de fibra óptica tienen varias ventajas entre ellas, una sensibilidad más alta, el tamaño y peso reducidos, la inmunidad a la interferencia electromagnética, además de ser relativamente económico (Alavi & Buttlar, 2019). Los sensores de fibra óptica vienen en variedades y tipos que puede clasificarse según su intensidad, microcurvatura, capacidad interferométrica, intensidad, polarimétricos, según su

longitud de onda o dependiendo de la técnica de dispersión utilizada ya sea dispersión de Brillouin, Rayleigh o Raman (Grattan & Meggitt, 1995).

3.1 Clasificación básica de fibra óptica

En el análisis electromagnético sobre la propagación de las señales en las fibras ópticas se desprenden dos posibles modos de campo (Ver fig. 17) que son los que tienen la capacidad de guiar las señales (Boquera, 2005). Las diferentes trayectorias que puede seguir un haz de luz en el interior de una fibra son denominados modos de propagación. La propiedad de guiar o uno o múltiples modos permite establecer una clasificación básica de las fibras:

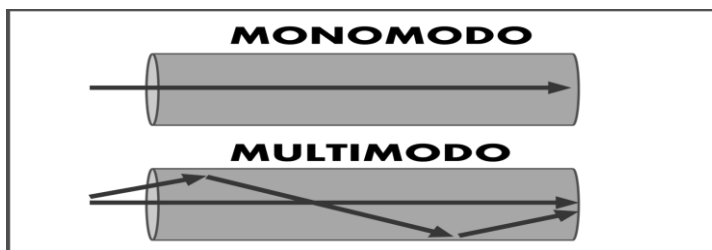


Figura 17. Tipos de fibra óptica. Adaptado de Boquera (2005). *Comunicaciones ópticas*. Madrid: Díaz de Santos S.A

- **Una fibra multimodo.** Es cuando a través de ella pueden propagarse muchos modos (rayos luminosos), en donde, cada uno sigue una trayectoria diferente dentro de la fibra óptica. Este efecto realizado hace que su ancho de banda sea inferior al de las fibras monomodo. Los dispositivos utilizados con el multimodo tienen un costo inferior al utilizado con tecnología LED. Este tipo de fibras son las más utilizadas para distancia menores a 10 km.

- **Una fibra monomodo.** Esta sólo admite la propagación del modo fundamental. Cuenta con un núcleo de la fibra muy pequeño lo que permite la propagación de un único rayo, el cual se

propaga directamente sin reflexión. Este efecto causa que su ancho de banda sea muy elevado, por lo que su utilización es más común en grandes distancias superiores a 10 km.

3.2 Estructura de una fibra óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión elaborado de un hilo muy fino de material transparente, puede ser de vidrio o materiales plásticos por el que se envían ondas o pulsos de luz que representan los datos a transmitir (Torres, 2012). La fibra óptica cuenta con tres capas: núcleo, cubierta y recubrimiento, (ver figura 18), descritas a continuación:

- **El núcleo:** Es la parte central, está elaborado en cuarzo puro al que se le añaden pequeñas cantidades de óxido de silicio y germanio. Este núcleo tiene un alto índice de refracción (es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío, y la velocidad de la luz en ese material) y un diámetro de 10 μm .

- **La cubierta:** elaborada de un material similar al núcleo, el índice de refracción es menor, lo que lleva a limitar el modo de propagación la luz, bordea el núcleo en toda su extensión y presenta un diámetro de 125 μm .

- **El revestimiento:** La última capa exterior de la fibra óptica, llamada revestimiento (hecha de acrilato) da a la fibra resistencia mecánica y la protege frente a posibles daños y humedad. tiene un diámetro de 250 μm .

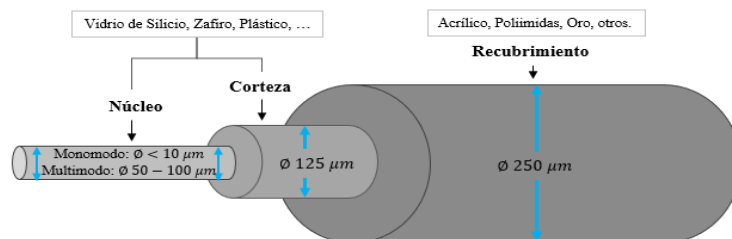


Figura 18. Capas de una fibra óptica. Adaptado de Frövel (2006).

La fibra óptica mostrada en la figura 19 tiene incluido un sensor FBG (Fiber Bragg Grating). Es un tipo de sensor instalado en un reducido segmento de la fibra óptica capaz de reflejar diferentes longitudes de onda de luz (Alan, 1999). Las señales que pasan por los sensores FBG se pueden desplazar debido a variaciones de temperatura o mide la influencia de deformaciones en la estructura en el sitio donde se instala el sensor FBG. Está constituida por un núcleo de vidrio óptico, una corteza de vidrio óptico y uno o dos revestimientos de plásticos (acrílicos, poliimidas) y metales (cobre u oro), depende del material en que van a ser integrado y la temperatura a la que será expuesta (Frövel, 2006).

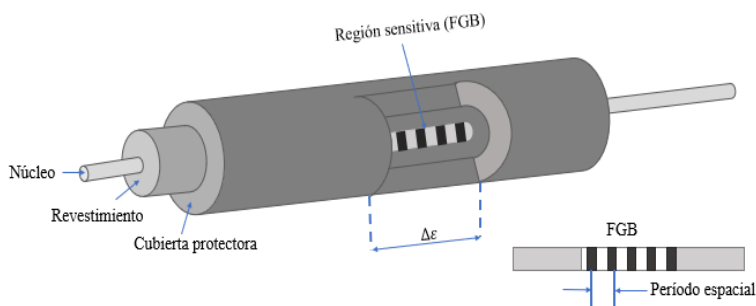


Figura 19. Esquema de una fibra óptica con rejilla FBG (Fiber Bragg Grating). Adaptado de Frövel (2006).

La figura 20 muestra como la luz llega al núcleo de la fibra óptica a través de una fuente o un láser, la luz dentro del núcleo puede viajar distancias muy grandes sin pérdida significativas de su intensidad (Frövel, 2006). Solo se pueden tener pérdidas importantes de intensidad cuando la fibra

está flexionada con radios pequeños menores de $R = 30$ mm; o cuando está sometida a fuerzas transversales significativas (p. 18).

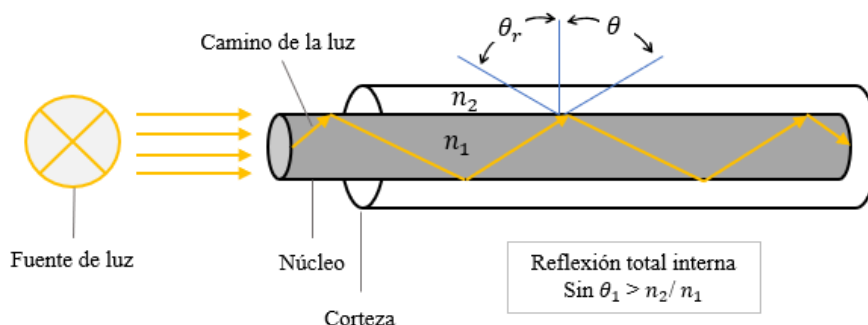


Figura 20. Transmisión de la luz en una fibra óptica, n_1 , n_2 = índice de refracción del núcleo, de la corteza. Adaptado de Frövel (2006).

3.3 Tipos de Sensores de Fibra Óptica

Los sensores de fibra óptica se pueden clasificar en función de varios criterios (ver figura 21). Sin embargo, todos ellos basan su funcionamiento en el estudio de las propiedades de la luz que viaja a través de ellos (Torres G. B., 2011).

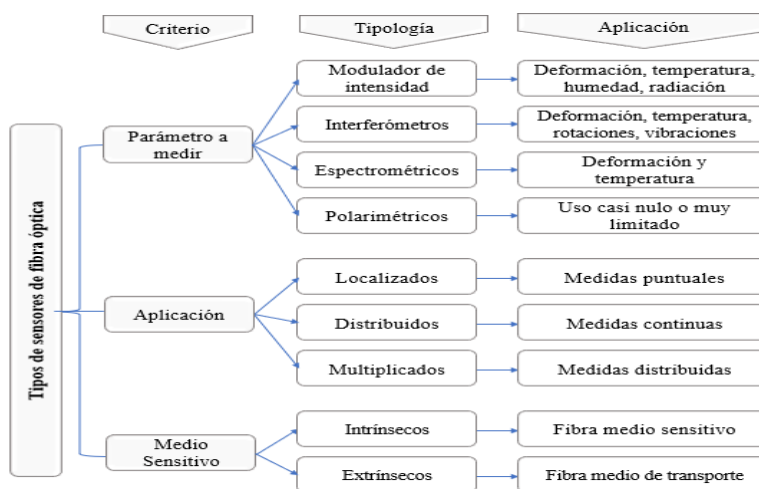


Figura 21. Tipos de sensores de fibra óptica. Tomado de Torres (2012),

3.3.1 Parámetros a medir. Se pueden medir los modulares de intensidad, sensores interferométricos, sensores espectrométricos, sensores polarimétricos.

- *Moduladores de intensidad.* Utilizado para monitorear o medir cualquier parámetro que pueda producir pérdidas de la potencia óptica de la luz guiada. Los principales fenómenos que producen atenuación de la luz son microcurvatura, temperatura, radiación ionizada. Estos sensores permiten medir deformaciones, temperatura, curvatura o humedad (Torres B. , 2012).

- *Sensores Interferométrico.* Sensor utilizado para medir o monitorizar el cambio de fase. Estos sensores ópticos son más precisos y sensibles. Los principales parámetros que pueden medir son deformaciones, temperaturas, vibraciones y rotaciones. Los sensores de este tipo más usuales son los llamados sensores Fabry-Perot (Torres, 2012).

- *Sensores espectrométricos.* Utilizados para controlar los cambios en la longitud de onda de la luz. Los más usuales son los Bragg-Grating. Su sensibilidad es menor que la de los sensores Interferométricos, pero su configuración, instalación y proceso de datos es mucho más simple (Torres, 2012).

- *Sensores polarimétricos.* Sensores basados en la polarización de la luz guiada. La sensibilidad de estos sensores es menor que la de los sensores interferométricos debido al ruido intrínseco del sistema. Son los que presentan menor uso y sensibilidad (Torres, 2012).

3.3.2 Tipos de Aplicación. Según su aplicación los sensores de fibra óptica se clasifican en localizados, distribuidos, multiplicados y se describen a continuación.

- *Localizados o multipunto FBG (Fiber Bragg Grating).* Son sensores utilizados para hacer medidas puntuales (tipo multipunto). La figura 22, muestra una sección longitudinal de un

elemento de hormigón sobre el que aparecen fisuras y está instrumentado con tres sensores de deformación puntuales localizados. Mientras que los sensores instalados próximos a las fisuras miden poca deformación, el sensor instalado justo sobre la fisura central proporciona un valor de deformación elevado. Para la aplicación de estos sensores, se deben conocer previamente los puntos de estudio (Ansari, 1997) (Torres, 2012).

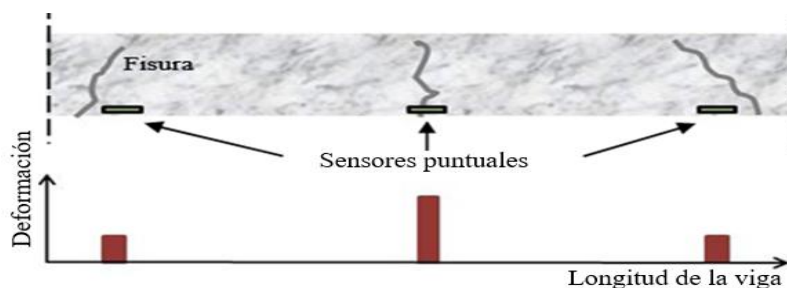


Figura 22. Sensores localizados. Adaptado de Sumitro, Okamoto y Inaudi, (2004).

- *Distribuidos.* Son sensores utilizados para realizar una medición continua a lo largo de una fibra. La ventaja de su aplicación es que con un solo cable de fibra óptica se puede medir en cualquier punto usando una única fuente de luz y un sistema de procesado. (Ver figura 23). No obstante, la precisión y la sensibilidad son mucho menores que la de los localizados (Ansari, 1997),(Torres, 2012). El resultado es una ley de deformaciones continua. A partir del BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) el sensor detecta la fisuración que se produce sobre el elemento estructural.

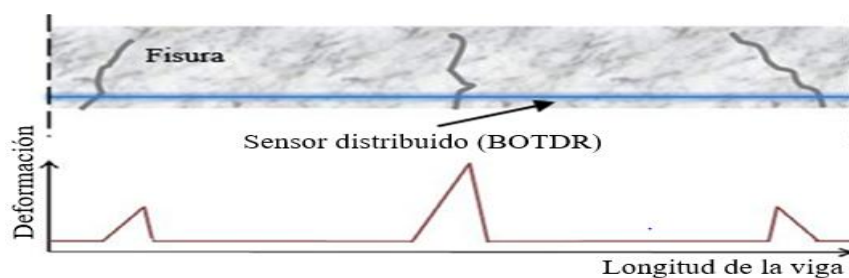


Figura 23. Sensor distribuido Brillouin Scattering. Adoptado de Torres (2012).

- **Multiplicados.** En la gama de los sensores de fibra óptica utilizados para el monitoreo de la salud estructural este es uno de los usuales. Su funcionamiento es parecido al de los sensores distribuidos. Normalmente se construyen mediante una combinación de varios sensores individuales o puntuales (Ansari 2007, Davis et al. 1997, Maaskant et al. 1997). Se muestra en la figura 24, una viga, pero esta vez instrumentada con sensores multiplicados de longitud. En este caso, el sensor proporciona el valor medio de las deformaciones entre los puntos de anclaje del sensor. Los sensores ópticos multiplicados más empleados son los sensores Bragg-Grating (Torres, 2012).

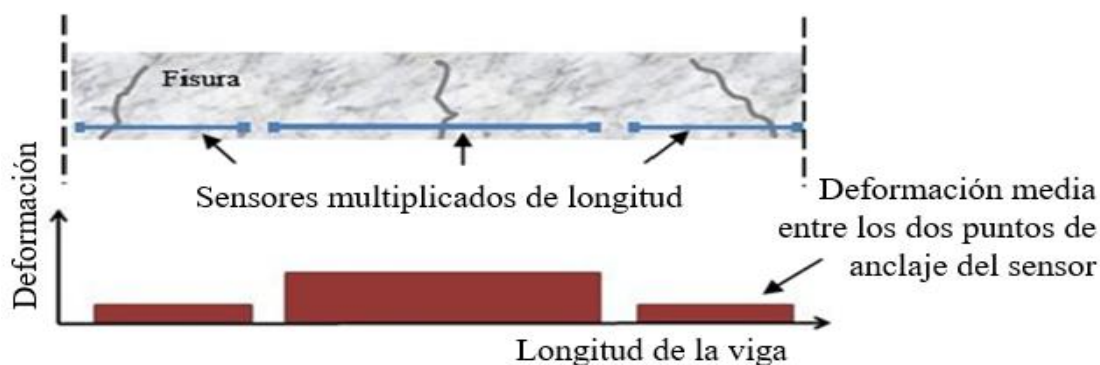


Figura 24. Sensores multiplicados. Tomado de Torres, (2012) y Sunaryo, Okamoto y Inaudi, (2004).

3.3.3 Medio Sensitivo. Abarca los sensores intrínsecos y extrínsecos.

- **Los sensores intrínsecos.** Utilizan la fibra óptica como elemento detección (Sunaryo, Okamoto, & Inaudi, 2004) Los sensores intrínsecos pueden medir el flujo de material a través de brechas de hasta un metro en el haz de luz. Este material causa ciertos cambios en la calidad de la luz, que pueden revelar información importante para el análisis. Las variaciones en la longitud de

la trayectoria óptica permiten hacer mediciones de la intensidad, polarización, fase y otras características de la onda de luz.

• **Los sensores extrínsecos.** Utilizan estos cables para transmitir información de luz de un teledetector a un procesador electrónico. Estos sensores se podrían diseñar para determinados usos. Por lo general, utiliza una fibra multimodo que puede permitir múltiples longitudes de onda, o haces de luz para transmitir información más compleja.

En la tabla 5 se muestra un resumen de las características generales de las fibras ópticas.

Tabla 5.

Características generales de las fibras ópticas

Opciones	Fibra Multimodo	Índice escalonado, Índice graduado
	Fibra Monomodo	Sin dispersión corrida Con dispersión corrida Con dispersión plana
Materiales	Vidrio	Sílica, Plástico, Polímeros
Parámetros	Diseños del cable	Apretado, Holgado Armado o no armado Número de fibras en el cable
	Tenuación Dispersión Pérdidas extrínsecas (empalmes, curvaturas, etc.). Variación con la temperatura Potencia de entrada Costo Capacidad de operar a condiciones más veloces	

Nota: Tomado de González (2001).

4. Sensores de fibra óptica FBG (Fiber Bragg Grating) para el monitoreo de la salud estructural de puentes

Los sensores de fibra óptica FBG (Fiber Bragg Grating) tienen gran potencial para el monitoreo y control en las estructuras debido al pequeño tamaño y adaptabilidad geométrica. Los sensores de fibra óptica se pueden integrar fácilmente a un sistema estructural de puentes de hormigón. Los sistemas estructurales instrumentados con sensores de fibra óptica FBG, pueden cumplir un doble propósito: 1) Proporcionar información sobre la calidad del hormigón a edades tempranas y 2) Un sensor óptico FBG distribuido ofrece información sobre la temperatura, la tensión, la deformación y las vibraciones desde cualquier punto a lo largo de la fibra óptica mediante la luz, a partir de la construcción, hasta años posteriores al uso del puente (Khadour & Waeytens, 2018), (Kesavan, Ravisankar, Parivallal, Sreeshylam, & Sridhar, 2010).

Para obtener un rendimiento fiable, un sensor de fibra óptica debe ser instalado correctamente, ya sea en la superficie de la estructura, o incrustado dentro de ella. Muchas investigaciones tal y como la que realizó Kesavan et.al. (2010) describen el desarrollo de técnicas para insertar de forma segura los sensores de fibra óptica en el hormigón, en este se desarrollaron técnicas adecuadas de incrustación de sensores de fibra óptica en el hormigón (ver figura 25). Sin embargo, la aplicación más común en el campo de los sensores de fibra óptica FBG, se ha desarrollado en mediciones directas de relajación de la tensión en cables de pretensado y postensado dentro de las vigas de hormigón de un puente (Maaskant et al., 1997).



Figura 25. Sensores de fibra óptica con diferentes técnicas de encapsulado. Adoptado de Sundaram, Kesavan, Parivallal, Ahmed, & Ravisankar (2011).

Los puentes operan en un entorno dinámico sometido cargas cíclicas. La integridad de las estructuras bajo tales condiciones de carga no se puede predecir a partir de sus respuestas bajo cargas estáticas. La predicción de la vida de las estructuras sometidas a ciclos de carga durante su servicio es una característica importante de controlar (Sundaram, Kesavan, Parivallal, Ahmed, & Ravisankar, 2011).

Un estudio realizado por Kesavan et al. (2010), analizó el rendimiento de sensores de fibra óptica FBG sometidos a carga cíclica, (ver Figura 26 y Figura 27). La instalación del sensor de fibra óptica FBG, sobre el refuerzo de una viga que fue sometida a cargas cíclicas, aplicando una carga sinusoidal, que van desde un mínimo de 8,49 MPa a un máximo de 14,1 MPa, a una frecuencia de 10 Hz. Se evaluó hasta 2 millones de ciclos de carga. Las mediciones de los sensores de fibra óptica fueron consistentes con las amplitudes de carga durante el ensayo de fatiga (Kesavan et al., 2010). Aunque el análisis con la viga arrojó unos resultados muy prometedores, falta mucha más instrumentación a escala mucho más reales para evaluar los efectos de la fatiga, sin embargo, hay una aproximación a la aplicación de fibra óptica en el monitoreo de cargas cíclicas y sus efectos en los puentes.

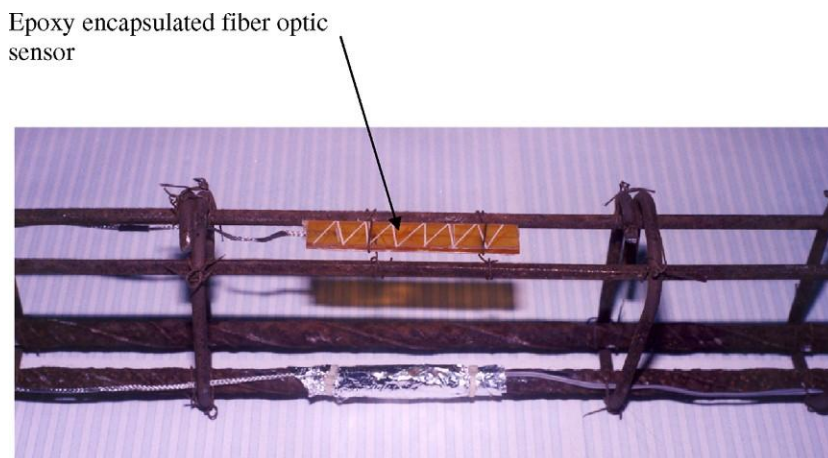


Figura 26. Instrumentación y detalles de sensor fibra óptica. Adoptado en Kesavan, Ravisankar, Parivallal, Sreeshylam y Sridhar, (2010).

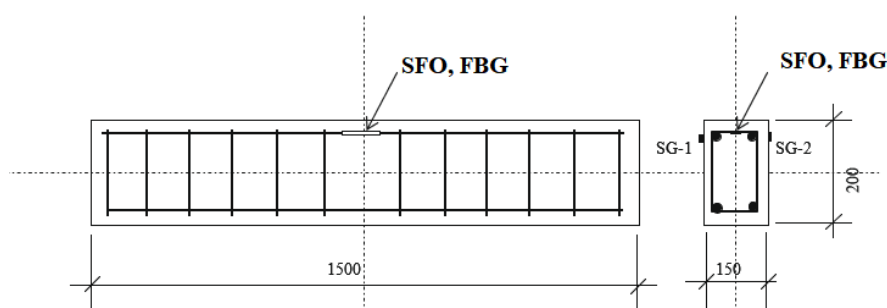


Figura 27. Croquis que muestra los detalles del SFO para la prueba de fatiga. Todas las dimensiones están en mm. Adoptada de Kesavan et.al (2010).

4.1 Generalidades de los sensores de fibra óptica FBG

Existe una variedad de tecnologías de sensores ópticos, donde se pueden mencionar los interferómetros Fabry-Perot, Fiber Bragg Grating (FBG), sensores distribuidos sobre la base de Rayleigh, Raman y técnicas de dispersión óptica de Brillouin. Los sensores FBG son más versátiles y ampliamente utilizado, estos reflejan longitudes de onda de luz que se transmite en variaciones

de temperatura o esfuerzo, estas a su vez tienen características que resultan muy convenientes en monitoreo en el campo de la ingeniería civil, en nuestro caso en el estudio de puentes, dentro las virtudes de los sensores de fibra óptica FBG se encuentran:

- No requieren calibración durante su vida útil
- Material liviano, fácil manejo
- Tiempo de respuesta rápido
- Mayor durabilidad
- No son conductivos
- Son inmunes al ruido inducido y a la interferencia electromagnética
- Pueden instalarse varios sensores, de distinto orden y diferente tipo (esfuerzo, temperatura, acelerómetro, presión) en un mismo cable de fibra óptica
- Realizan mediciones a distancias muy grandes hasta 15 km
- Son pasivos eléctricamente
- No se verá afectada por cualquier campo electromagnético
- No se afectará por la interferencia producida por un tren o un carro que pase cerca
- Potencialmente resistente a una onda explosiva.

4.2 Fundamentos de los sensores de Fibra Óptica FBG.

Los sensores de fibra óptica basados en FBG son fabricados por exposición de la superficie de la fibra óptica a la luz UV, que cambia la composición química de la fibra óptica, cambiando de este

modo el índice de refracción. Las rejillas de Bragg tienen un índice de refracción periódica que se forma mediante la transmisión de energía pulsada a partir de una fuente de luz UV a través del núcleo de la fibra óptica; la red de Bragg refleja una longitud de onda particular de la luz basado en el índice de refracción periódica (Tae, Do-Hak, Moon, & Yun, 2016).

La longitud de onda Bragg reflejada en la rejilla es una función del índice de refracción efectivo y la longitud de paso de la rejilla. Debido a que estos valores se ven afectados por las características físicas externas (por ejemplo, tensión y temperatura), la longitud de onda Bragg también cambia con estas propiedades. La tabla 6 muestra las características de transmisión y reflexión en los sensores de fibra óptica FBG.

Tabla 6.

Tipos de Sensores de FBG

Tipos	Aplicación
D-01; MS-05	Sensores de deformaciones
ES-01	Sensores de deformaciones embebibles
MS-01; MS-02; S-02; S-03	Sensores de deformación de aplicación en superficie.
MS-03	Sensores de deformación con compensación de humedad
P-01	Sensores de presión
T-04; T-06	Sensores de temperatura
T-07	Sensores de temperatura antihumedad
T-09; T-10	Sensores de temperatura para componentes eléctricos
T-11	Sensores de temperatura tamaño reducido
T-14	Sensores de temperatura para transformadores

Nota: Sensores de fibra FBG -Fiber Bragg Grating. Adoptado de Grupo Cofitel (2015).

La longitud de onda Bragg reflejada en la rejilla es una función del índice de refracción efectivo y la longitud de paso de la rejilla. Debido a que estos valores se ven afectados por las características físicas externas (por ejemplo, tensión y temperatura), la longitud de onda Bragg también cambia con estas propiedades. La figura 28 muestra las características de transmisión y reflexión en los sensores de fibra óptica FBG.

La longitud de onda de Bragg está dada por

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

Donde:

λ_B : es la longitud de onda de Bragg de la FBG.

n_{eff} : es el índice de refracción efectivo del núcleo de fibra.

Λ : es la longitud de paso, o el espaciamiento, de la rejilla.

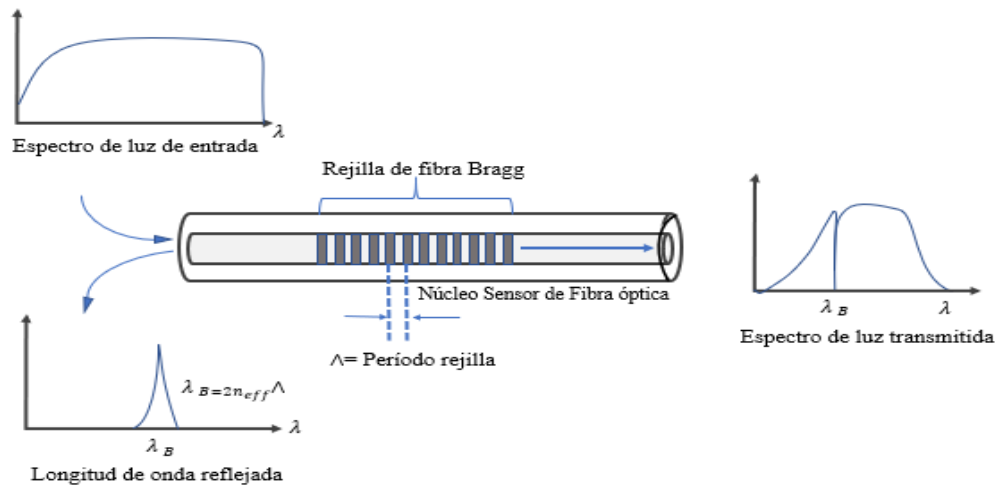


Figura 28. Características de transmisión y reflexión en los sensores de fibra óptica FBG. Adaptado de Navarro (2014).

Debido a que la longitud de onda Bragg (λ_B) es una función de la separación entre las rejillas, los sensores de fibra óptica FBG se pueden fabricar de distintas longitudes de onda Bragg, lo que permite a los diferentes sensores FBG reflejar longitudes de onda de luz específicas. Cualquier cambio en la distancia de separación entre las rejillas cambiará la longitud de onda Bragg (λ_B). En consecuencia, cualquier temperatura o efecto de esfuerzo inducido (*strain*) en el sensor FBG podrá

ser determinado por el correspondiente desplazamiento en la longitud de onda central Bragg reflejada (Navarro, 2014).

Al medir con precisión el cambio de la longitud de onda de Bragg, es posible calcular los cambios desconocidos aplicado al sensor FBG:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B * [(1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T]$$

Donde:

λ_B : Es la longitud de onda de Bragg de la FBG inicial,

$\Delta\lambda_B$ = Es el cambio de longitud de onda Bragg.

α = Es el coeficiente de expansión térmica para la fibra óptica

ξ = Es el coeficiente termo-óptico de la fibra óptica

ΔT = Es el cambio de temperatura

P_e = Es la constante de fotoelástico de la fibra óptica (por ejemplo, para germane-silicato de vidrio $P_e = 0,22$)

$\Delta\varepsilon$ = Es el cambio de tensión

El primer término de la expresión, $(1 - P_e)\Delta\varepsilon$, describe el cambio que ocurre en la longitud de onda Bragg debido a la aplicación de un esfuerzo (*strain*) ya sea de tensión, compresión, flexión o torsión.

El segundo término $(\alpha + \xi)\Delta T$ describe el impacto debido a la temperatura en el cambio de longitud de onda.

El monitoreo basado en una plataforma de sensores FBG ha permitido implementar estrategias para la identificación de daños en varios niveles (detección, localización, tipificación, severidad), alertando por anticipado sobre posibles condiciones de riesgo de un puente. Además, si se cuenta con una base de datos y un sistema de monitoreo a largo plazo, es factible evaluar la magnitud de los daños y estimar la vida útil restante de una (Navarro, 2014).

Se puede estimar que entre los monitoreos de salud estructural de puentes más importantes para valorar el estado de desempeño de estos se encuentran las deformaciones, desplazamientos, deflexión y vibraciones, estos resultados dinámicos o estáticos pueden ser medidos con los siguientes tipos de sensores de fibra óptica FBG.

4.3 Medidor de esfuerzo FBG

A medida que la tensión axial, ϵ , se aplica a la FBG, la longitud de onda de Bragg se desplaza a longitudes de onda más bajas denominadas “compresión” o las longitudes de onda más altas denominadas de “tensión”. La deformación aplicada se codifica así en el cambio de longitud de onda Bragg de FBG. Para el Caso específico de carga axial pura:

$$\epsilon = \frac{\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}}{(1 - P_e)}$$

$\Delta\lambda_B$ = es el cambio de longitud de onda Bragg,

λ_B : es la longitud de onda de Bragg de la FBG inicial,

P_e = es la constante de fotoelástico de la fibra óptica (por ejemplo, para fibra de -silicato de vidrio, $P_e = 0,22$)

El cambio en la longitud de onda de Bragg está linealmente relacionado con la deformación axial aplicada. La figura 29 muestra un sensor de esfuerzo (*strain*) de fibra óptica FBG con compensación de temperatura para medir deformación. Su tamaño aproximado es de 14 cm de largo por 2,5 cm de ancho. El límite de medición es de $\pm 2500\mu\epsilon$, con una sensibilidad $\approx 1.2\text{pm}/\mu\epsilon$; la vida útil por fatiga de 100×10^6 ciclos a $\pm 2000\mu\epsilon$; el rango operativo de temperatura de -40 a 80 °C. En cuanto a las especificaciones ópticas, el rango estándar de longitud de onda se extiende de 1512 a 1586nm, para un rango operativo de 74nm, dejando un distanciamiento recomendado de 4nm entre la medición de esfuerzo ($\mu\epsilon$). La figura 30 muestra en forma de bosquejo un gráfico sin escala con el espectro de las longitudes de onda de un sensor FBG de esfuerzo, compensado en temperatura, y ejemplifica la correspondiente medición de $\mu\epsilon$.



Figura 29. Sensor óptico FBG de esfuerzo: Os3155. Adaptado de(Navarro, 2014).

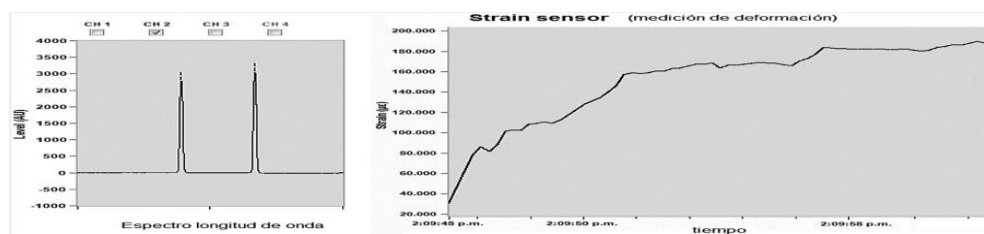


Figura 30. Ejemplo de medición de un sensor óptico FBG de esfuerzo con compensación de temperatura. Adaptado de Navarro (2014)

4.4 Medidor de Temperatura FBG

Es importante tener en cuenta que la sensibilidad térmica de un sensor FBG es considerablemente mayor que la de su homólogo medidor de deformación eléctrica, aumentando la necesidad de compensación térmica para aplicaciones de medición de deformación. Si se toma como referencia la sonda de temperatura para describir las características del sensor, el rango operativo de medición es de -40°C a 120°C . El tiempo de respuesta es de 1,5 segundos, con una exactitud a largo plazo de 1°C para la calibración estándar. En cuanto a las especificaciones ópticas, el rango estándar de longitud de onda se extiende de 1512 a 1588nm, para un rango operativo de 76nm, en intervalos de 4nm para el desplazamiento de las longitudes de onda sin interferencia (Navarro, 2014).

La figura 31 muestra, en forma de bosquejo, un gráfico sin escala del espectro de la longitud de onda de un sensor FBG de temperatura y la medición de temperatura correspondiente.

$$\Delta T = \frac{\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B}}{(\alpha + \xi)}$$

λ_B : Es la longitud de onda de Bragg de la FBG inicial

$\Delta \lambda_B$ = Es el cambio de longitud de onda Bragg

α = Es el coeficiente de expansión térmica para la fibra óptica

ξ = Es el coeficiente termo-óptico de la fibra óptica

$(\alpha + \xi)$ = Un valor típico fusionado para fibra óptica de silicio es de $6.67 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1.52}$

ΔT = Es el cambio de temperatura.

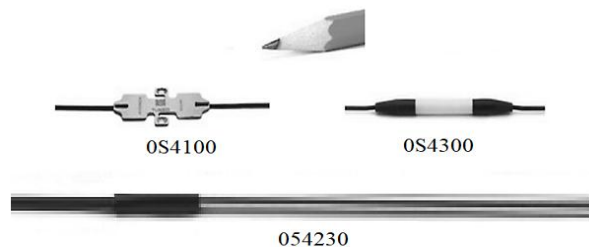


Figura 31. Sensores ópticos FBG de temperatura. Adaptado de Navarro (2014)

4.5 Medidor de Aceleraciones FBG

La función de este tipo de sensor es realizar mediciones de la aceleración en grandes estructuras y en un rango de frecuencias bajas, desde 0 a 300 Hertz. (ver figura 32), Soporta un pico de impacto máximo de 100 g. El rango operativo de temperatura es de -40 a 80 °C. Para el propósito de análisis dinámico, presenta una frecuencia de resonancia de aproximadamente 700 Hertz, con un peso de 28 gramos. En cuanto a las especificaciones ópticas, el rango estándar de longitud de onda se extiende de 1516 a 1588nm, para un rango operativo de 72nm, con intervalos de al menos 4nm entre cada eje (Navarro, 2014).

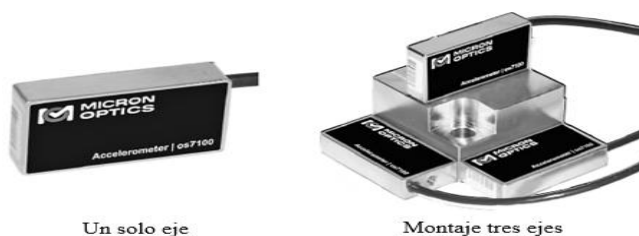


Figura 32. Acelerómetro FBG para medición de vibraciones: Os 7100. Adoptado de Navarro

5. Casos de éxito

Los puentes están expuestos durante su vida útil a varios factores que pueden afectar su funcionalidad, como terremotos, cargas de viento, deterioro de sus elementos por fatiga; por lo tanto, se debe valorar la condición del puente bajo estándares de servicio y seguridad que conlleve a desarrollar estrategias para su conservación, mantenimiento y seguridad de los usuarios. Los sensores de fibra óptica permiten medir la deformación y la temperatura de las construcciones. Estos instrumentos pueden incrustarse en diferentes lugares de la estructura y garantizan una información oportuna de posibles eventos a los que se encuentre expuesta la obra. El principal reto es medir los parámetros estructurales a lo largo de la fibra óptica en la estructura civil, con una buena resolución y espacio aceptable y una medición en tiempo razonable. En la tabla 7 se presentan algunos casos de éxito de monitoreo de puentes instrumentados en todo el mundo con tecnología de fibra óptica FBG.

Tabla 7.
Monitoreo de puentes con Fibra óptica

Puentes	País	Año de aplicación del monitoreo
Río Virilla en la Ruta Nacional No. 32	Costa Rica	2016
Carrizo	México	2013
Papaloapan	México	2012
Chulitna River Bridge, Denali State Park	Alaska	2012
Bitan Bridge, Taipei	Taiwan	2011
Vicksburg Bridge	Vicksburg, MS	2010
Sung San Bridge	South Korea	2009
Arsenal Bridge	Rock Island, IL	2009
Chiapas Bridge, Chiapas	México	2008
Sapgyo Grand Bridge	South Korea	2008
Manhattan Bridge	Manhattan, New York	2005-2007
Hampden Bridge, Kangaroo Valley	NSW, Australia	2005

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ambher, 2014).

Otras estructuras que también son monitoreadas con fibra óptica: Puente Viaducto Beltrán (México), Puente Baluarte (México), Yokohama Bay Bridge (Japón), Huanghe Bridge (China), Chongqing Guangyang Dao (China) (Ambher, 2014).

Se presenta en esta sección un análisis de casos de éxito del monitoreo de la salud estructural de puentes con fibra óptica FBG. 14 casos de aplicación se relacionan en la tabla 7 pero solo se analizarán 7 casos, dando particular énfasis a las aplicaciones hechas en México, Costa Rica, Estados Unidos, Australia y Korea, sin embargo, otro factor se debe a la cantidad y calidad de la información encontrada de dichos puentes. Es importante resaltar el aumento del uso de las fibras ópticas como sensores de monitoreo en puentes en el mundo.

5.1 Caso 1. Puente El Carrizo, en México

Este puente se encuentra ubicado en la carretera Durango-Mazatlán como permite una ruta directa y segura entre el Golfo de México y la costa del Pacífico. Siendo una gran oportunidad para el desarrollo interoceánico, en materia comercial y turística. El puente el Carrizo cuenta con una plataforma que emite automáticamente una alarma con información relevante cuando detecta una anomalía en la estructura. Este monitoreo permite conocer el estado estructural del puente y de esta forma priorizar estrategias para la evaluación de la integridad estructural y detección oportuna de daño (ver figura 33). (Crespo, y otros, 2014).



Figura 33. Puente el Carrizo. Adaptado de Crespo et.al, 2014). Plataforma para el análisis y visualización de señales para el monitoreo remoto de estructuras.

Para el año 2013 se aplicó el monitoreo estructural del puente “El Carrizo”, que se encuentra ubicado en la autopista Durango-Mazatlán.

El objetivo general del monitoreo. Evaluar la respuesta estructural ante cargas estáticas y dinámicas, verificando la adecuada concepción y construcción del puente.

Procedimiento: El puente se instrumentó con sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg. Se instalaron un total de 24 sensores en la estructura del puente, estas fibras permiten medir los diversos efectos producidos por las cargas dinámicas, las fuerzas inerciales, las deformaciones, cambios estructurales, deflexiones, esfuerzos en las vigas, efectos térmicos, vibraciones y cargas producidas por el paso vehicular. (Crespo, y otros, 2014).

Por medio del programa de modelamiento de ingeniería estructural y elementos finitos SAP2000 se realiza el análisis de los datos de monitoreo, comparando una serie de valores registrados por los sensores de fibra óptica y los valores generados por un modelo de elementos finitos. (Crespo, y otros, 2014).

Se realizaron una serie de pruebas evaluando la condición estructural del doble voladizo, colocando vehículos en diversas posiciones del puente y de esta forma tomando los datos de las

respuestas generados por los sensores instalados bajo las diversas condiciones de carga y así adecuar un modelo matemático para la simulación de la estructura sometida a condiciones extremas de carga y de esta forma evaluando la condición estructural. Todo esto permitió establecer que el puente posee la capacidad estructural necesaria dentro de los márgenes de seguridad y este mantiene una vigilancia adecuada de los pesos de los vehículos por medio del sistema de monitoreo. (Crespo, y otros, 2014).

5.2 Caso 2. Puente Ruta Nacional No. 32, en Costa Rica

El puente Ruta Nacional No. 32 es una importante obra de ingeniería en Costa Rica (ver figura 34) que conecta el cantón de Tibás de la provincia de San José con el cantón de Santo Domingo de la provincia de Heredia. El puente fue construido bajo la técnica de voladizos sucesivos colocando las pilas y luego construyendo tramos parciales hacia cada lado, los cuales se sostienen del tramo anterior, de forma que se mantiene el equilibrio de la estructura y no se causa afectación al puente paralelo. En este caso se realiza el monitoreo como un proceso sistemático de observación, recolección y análisis de datos con el objetivo de darle seguimiento al progreso y evolución del puente, monitoreando las estructuras por medio de vibraciones, las cuales surgen por una serie de cargas dinámicas las cuales pueden afectar el puente. (Lui-Kuan & Agüero-Barrantes, 2017)



Figura 34. El puente sobre el río Virilla en la Ruta Nacional No. 32. Adaptado de Lui-Kuan y Agüero (2017).

El objetivo general del monitoreo. Monitorear la condición estructural del puente en el tiempo por medio de sensores que perciben las aceleraciones inducidas principalmente por la carga vehicular en el puente ubicado sobre el río Virilla.

Procedimiento: Al puente se le aplicaron evaluaciones basadas en vibraciones ambientales inducidas por medio de cargas dinámicas que afectan la estructura. Para el monitoreo se utilizaron sistemas portátiles y se ubicaron los sensores en las aceras del puente. Estos sensores tienen la capacidad de percibir los niveles de aceleración inducidos por la carga vehicular y son registrados de forma sincrónica a través de la utilización de unidades de adquisición de datos vía Wi-Fi. (ver figura 35).

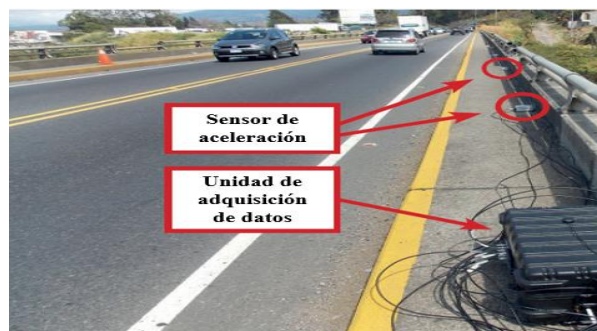


Figura 35. Sensores y las unidades de adquisición de datos de aceleración. Adoptado de Lui-Kuan & Agüero-Barrantes (2017).

Los sensores y las unidades de adquisición y aceleración fueron implementados con éxito. Estos sistemas de monitoreo sofisticados permiten afrontar las problemáticas que puedan afectar la salud de estructural del puente. Para el análisis de la información, se realiza un procesamiento de datos y se determinan una serie de parámetros dinámicos de la estructura como los resultados del análisis

permiten monitorear la condición estructural del puente en el tiempo. (Lui-Kuan & Agüero-Barrantes, 2017)

5.3 Caso 3. Puente Río Papaloapan, en México

El puente Río Papaloapan es una importante estructura ubicada en la autopista de la Tinaja-Acayucan en el estado de Veracruz de México, dicha estructura permite la conexión entre el centro y sur del país. Este puente se encuentra ubicado en una zona geográfica susceptible de fenómenos meteorológicos por su cercanía al golfo de México zona recurrente a ciclones, huracanes, tormentas y condiciones climáticas desfavorables. (ver figura 36).



Figura 36. Puente Río Papaloapan. Adoptado de Crespo et.al, (2014).

Con la utilización de la fibra óptica se busca implementar un sistema inteligente de monitoreo y protocolos de actuación en el puente, que permitan realizar una caracterización estructural y un seguimiento a la tensión axial presentada en los tirantes de la estructura del puente, así como realizar un seguimiento de parámetros como deformación en elementos estructurales como las vigas, desplazamiento lineal y fenómenos ambientales.

El objetivo general del monitoreo. Determinar la probabilidad de presentación de fallas en los elementos de anclaje y calcular el índice de confiabilidad, posterior a la rehabilitación.

Procedimiento. La instrumentación del puente se realizó a finales del 2012. Se desarrolló en dos fases: primero se realizó la instalación de un sistema de suministro eléctrico basado en sistemas de celdas fotovoltaicas. La segunda fase consistió en la instrumentación, se utilizaron sensores de fibra óptica en rejillas de bragg FBG para conocer el comportamiento estructural del puente. Se realizó un proceso de instrumentación e instalación de los sensores de fibra óptica y demás equipos, en el cual, se colocaron en total 62 sensores de fibra óptica distribuidos por todo el Puente Río Papaloapan, de los cuales 24 son extensómetros para concreto, 24 sensores de aceleración, 5 sensores de temperatura, 8 inclinómetros y 1 Sensor de desplazamiento. Los equipos y sensores de fibra óptica utilizados en el puente Río Papaloapan se ven en la tabla 8 Se realizaron pruebas dinámicas controladas en una serie de intervalos periódicos, correlacionando la demanda de las cargas vivas presentadas por medio de la calibración de un modelo de elemento finito por medio de la técnica de simulación de Monte Carlo. (Crespo, y otros, 2014)

Tabla 8.

Equipos y sensores de fibra óptica elegidos para el puente Río Papaloapan.

Unidad	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 multiplexa los canales del interrogador para conseguir 16 canales.	Micron Optics	sm-041
1	Sensor de desplazamiento	Sensor para medir desplazamientos.	Micron Optics	os5100
5	Sensores de temperatura	Sensor para medir cambios de temperatura.	Micron Optics	os4350
8	Inclinómetros	Sensor para medir inclinaciones.	FBG TECH	T1-310
24	Acelerómetros	Sensor para medir vibraciones.	Micron Optics	os7100

24	Extensómetros	Sensor para medir deformaciones unitarias en concreto.	Micron Optics os3600
----	---------------	--	----------------------

Nota: Pie Cada uno de los sensores adquiridos para el monitoreo del puente Río Papaloapan cuenta con su respectiva hoja de calibración de acuerdo a lo requerido en la estructura. Adoptado de. Crespo et.al (2014).

5.4 Caso 4. Puente Hampden, en Australia

En este caso se realiza el monitoreo al Hampden Bridge (Puente Hampden), el diseño es de un puente colgante de un solo tramo que se encuentra sobre el río Kangaroo, en la ciudad de Kangaroo Valley, Nueva Gales del Sur, Australia. Este puente es la entrada a las tierras altas del sur y a la costa sur. Esta obra de ingeniería lleva el nombre de Lord Hampden Gobernador de Nueva Gales del Sur de 1895 a 1899 (ver figura 37).



Figura 37. El puente Hampden, en Australia. Adaptado de Micron_Optics (2016).

El objetivo general del monitoreo. Evaluar las condiciones del puente, asegurando en todo momento la seguridad. la salud estructural, la protección y preservación de valor del patrimonio cultural del puente.

Procedimiento: Se desarrolló e implementó un sistema automatizado de Monitoreo de la Salud Estructural (MSE) a largo plazo para el puente. Se utilizaron sensores FBG para proporcionar

información cuantitativa en tiempo real sobre el estado estructural del puente Hampden. Se utilizaron sensores multiplexados por los cuales circulan señales digitales codificadas por una sola línea. Estos sensores son examinados en una sala de control en el pilar del puente (ver figura 38) (Micron_Optics, 2016).

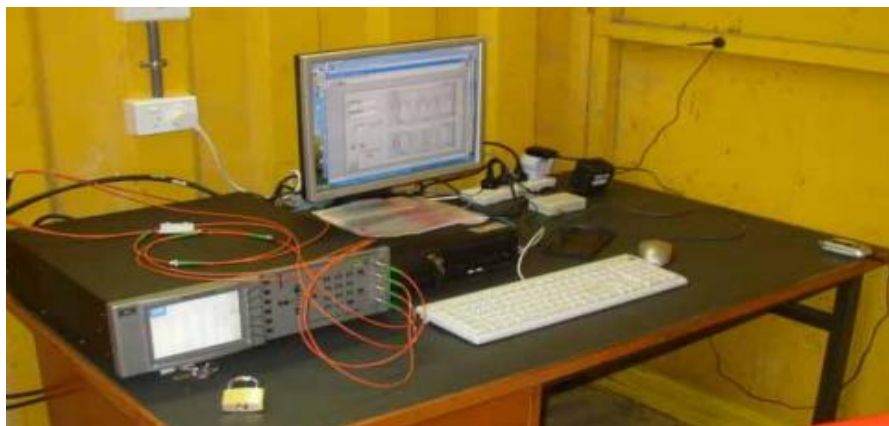


Figura 38. Sistema de Monitoreo del puente colgante de Hampden. Adaptado de Micron_Optics (2016).

Para el proceso de monitoreo se utilizó el equipo Micron Optics si 425-500, el cual se encarga de interrogar continuamente los diferentes sensores. Los datos adquiridos son procesados y posteriormente transmitidos automáticamente. Este sistema de monitoreo proporciona una medida en tiempo real de la condición estructural del puente (Micron_Optics, 2016) .

5.5 Caso 5. Puente de Manhattan, Nueva York, en Estados Unidos

El Manhattan Bridge (Puente de Manhattan) es una importante obra civil desarrollada en Estados Unidos. Este puente fue inaugurado el 31 de diciembre de 1909 en la ciudad de Nueva York. Esta espectacular obra de ingeniería es un puente colgante que cruza el río del Este en la ciudad de

Nueva York, el cual conecta a Manhattan con Brooklyn, en Long Island. Este puente es uno de los símbolos más reconocidos de la ciudad. (ver figura 39) (Micron Optics, 2016).



Figura 39. El puente Manhattan. Adaptado de Micron_Optics (2016).

El objetivo general del monitoreo. Monitorear la Salud Estructural del puente, midiendo la tensión en el cable principal en función de las variaciones de temperatura, hora del día, época del año y condiciones de tráfico.

Procedimiento: Se desarrolló un sistema automatizado de largo plazo para el Monitoreo de la Salud Estructural (MSE) del puente de Manhattan. Se utilizaron una serie de sensores FBG para proporcionar información cuantitativa en tiempo real sobre el estado estructural del puente. (ver figura 40). Se utilizaron 4 sensores de tensión y temperatura y 4 Galgas ópticas extensiométricas Micron Optics os3100. Los sensores SOFO son de 6 metros y se han instalado en una de las principales cepas de cable y se utilizan 2 Sensores Bragg, para medir las deformaciones, ancladas en las hebras, de forma individual (Micron Optics, 2016).



Figura 40. Sistema de Monitoreo del puente Manhattan. Adaptado de Micron Optics (2016)

Por medio de los sensores se puede realizar un análisis de la información, buscando adquirir datos continuos a largo plazo sobre la deformación y las temperaturas del cable principal y de anclaje del puente, los datos generados por el sistema de monitorización se utilizan para proporcionar datos de referencia y para evaluar la posibilidad de detectar daños a través de control de deformaciones.

5.6 Caso 6. El Gran Puente de Sapgyo, Corea del Sur.

El Instituto de Tecnología de la Construcción de Corea del Sur, en julio de 2008 contrató la instrumentación del puente mediante la empresa Micron Optics para la construcción de un banco de pruebas mediante un sistema de Monitoreo de la Salud Estructural (MSE) para conocer deformaciones y daños estructurales en el puente Sapgyo empleando sensores de fibra óptica con rejillas de bragg FBG. (Ver figura 41)



Figura 41. El Gran Puente de Sapgyo, Corea del Sur. Adaptado de Micron Optics (2008).

El objetivo general del monitoreo. Proporcionar información en tiempo real cuantitativa sobre la respuesta del puente a las deformaciones y los cambios ambientales, y la predicción rápida de la integridad de la estructura. (ver figura 42)



Figura 42. Sistema de sensores y adquisición de datos. Adoptado de Micron Optics (2008).

Procedimiento: Se desarrolló el monitoreo instalando sensores de fibra óptica con rejillas de bragg FBG y sensores de adquisición de datos y de temperatura. Estos fueron instalados en la estructura del puente, estas fibras permiten medir los diversos efectos del medio ambiente, temperatura, deformaciones. Estos sensores de adquisición de datos se encuentran conectados a

través de un cable de fibra óptica a internet, transmitiendo los datos de la estructura y realizando seguimiento en forma remota (Micron Optics, 2008).

Se realizó un análisis de los datos por medio de una serie de mediciones continuas realizadas para controlar el comportamiento del puente y su evolución con el tiempo, los cambios ambientales y se evidenciaron los beneficios de los sensores FBG al proporcionar información cuantitativa en tiempo real para el Monitoreo de la Salud Estructural (MSE) a largo plazo en la estructura del puente (Micron Optics, 2008).

5.7 Caso 7. Puentes Arsenal- Rock Island, IL.

El puente Arsenal de Rock Island, IL es una estructura combinada carretera-ferrocarril. En un proyecto desarrollado en los años 2009-2010 se empleó un sistema en el puente para reducir en gran medida el riesgo de fallo catastrófico de la advertencia previa de los crecientes problemas estructurales causados por la corrosión y degradación de los materiales. (Ver figura 43)



Figura 43. Puente Arsenal. Adoptado de Micron Optics (2009)

El objetivo general del monitoreo. Controlar la integridad y el comportamiento de la estructura del puente, y los efectos debidos al alto tráfico de camiones pesados y cargas que podrían causar posibles daños y la fatiga.

Procedimiento: Se instalaron unos sistemas de vigilancia Chandler, Inc. Posteriormente se acopló la instrumentación: Un Micron Optics sm130-500, un sm041-416. Se utilizaron Treinta y seis sensores (36) os3100 para medir deformaciones, veintiún (21) sensores os4300 de temperatura, diez (10) sensores os7100 3D acelerómetros, un (1) de fibra óptica Meter Convencional AE, utilizado como sensor de corrosión (Micron Optics, 2009).

Los sensores fueron instalados a lo largo de la longitud de toda la estructura, incluyendo la cubierta del carril de arriba y la cubierta de carretera por debajo. El puente se encuentra clasificado en cuatro zonas diferentes.

Zona 1: Un total de 15 sensores que cubren la cubierta superior e inferior. Sensores consisten en: (6) Tensión, (5) Temperatura, (4) Accel 3D. La Zona 2: Conformado por (13) sensores de deformación, (6) sensores de temperatura, (1) acelerómetro 3D, (1) Medidor de inclinación. La Zona 3: Se instalaron (11) sensores de deformación, (4) Sensores de temperatura, (1) acelerómetro 3D. La zona 4: Un total de 15 sensores cubre la cubierta superior e inferior. Estos sensores consisten en: (6) de Tensión, (5) Temperatura, (4) Accel 3D. (Micron Optics, 2009)

6. Análisis crítico

6.1 Análisis de la infraestructura de puentes en Colombia

En Colombia, las obras de cuarta generación o también llamadas las 4G, fueron estructuradas como un programa de revolución de la infraestructura vial, para atender una necesidad del país de la apertura economía con otros países. La llegada de los tratados de libre comercio y la necesidad de volcar a Colombia hacia la competitividad, hizo necesaria la inversión para tener unas vías que ahorraran tiempo, costos de transporte para la población civil y las empresas, siendo uno de los proyectos más ambiciosos del país con una inversión estimada de 47 billones de pesos.

Los puentes son una pieza clave en la articulación de la infraestructura vial. Se estima que el país invertirá casi 47 billones en las vías 4G, hasta el 2035 (DNP, 2012). El departamento nacional de planeación (DNP) relaciona que solo en 30 proyectos de corredores viales se prevé la construcción de 918 puentes, y en la totalidad de las vías concesionadas de primera, segunda, tercera y cuarta generación se tienen proyectados por lo menos 1.542 puentes. (Agencia Nacional de Infraestructura [ANI], 2018)

Invias y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, celebraron un contrato que permitía analizar el estado de 883 puentes ubicados en los seis corredores viales: Bogotá-Buenaventura-Cali-Mediacanoa, Medellín-Manizales-Pereira-Armenia, Medellín-Bucaramanga, Bogotá-Barranquilla, Cartagena-Medellín y Bogotá-Yopa. Aunque aún no se conoce la totalidad de los resultados de los análisis sobre el estado de los puentes, se estima que desde 2010 se han construido 254 puentes y otros 182 han sido repotenciados (EL ESPECTADOR, 2018)

En la tabla 9 se relacionan algunos de los puentes con mayor longitud hechos en Colombia, con datos del Instituto Nacional de Vías (Invías), Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) y Fondo Adaptación.

Tabla 9.

Puentes con mayor longitud construidos en Colombia

PUENTES CON MAYOR LONGITUD EN COLOMBIA		
PUENTE	LONGITUD	UBICACIÓN
Roncador	2,3 km	Comunicará Mompox Magangué
Pumarejo 2	2,2 km	Conectará Barranquilla con Santa Marta
Pumarejo 1	1,49 km	Barranquilla
Puente Madre Laura	1,48 km	Medellín
Nuevo Puente Río Magdalena	1,36 km	Puerto Berrío
La Paz	1,13 km	Conecta Antioquia con Boyacá
Carlos Lleras Restrepo	1 km	Caucasia
Puente Nowen	914 m	San José del Guaviare
Río Sogamoso	746 m	La lizama (santander) y San alberto (Cesar)
Bojabá	720,3 m	Arauca y Boyacá

Nota: puentes con mayor longitud construido en Colombia.

Aunque con lo anteriormente expuesto y con un panorama prometedor para la infraestructura vial colombiana, el caso del puente Chirajara contextualiza la realidad de las concesiones en Colombia y los problemas a los que están siendo expuestos los nuevos puentes y los ya existentes. Esto devela la trascendencia y lo urgente de medidas de prevención, de revisión, lo cual genera la siguiente pregunta: ¿existe una forma de conocer daños estructurales en puentes, prevenirlos y corregirlos? La respuesta ha surgido con el monitoreo de la salud estructural (Structural Health Monitoring o SHM). Es por esto, que la temática de salud estructural en puentes ha tomado un papel preponderante en los últimos años. Dado que, se debe monitorear la salud o estado de las estructuras civiles y para ello se requiere el establecimiento de una serie de planes y procesos de

monitoreo que permitan detectar indicadores de daño y así tomar decisiones oportunas de intervención.

La conservación de las estructuras que hacen parte de la red vial nacional es una necesidad latente que no ha recibido la trascendencia que merece a nivel nacional, de modo que permita implementar procedimientos o métodos de mantenimiento y conservación adecuados y eficientes que garanticen los factores de seguridad, usabilidad, estética y economía. Por todo esto, el país debe invertir más capital en investigación, desarrollo y aplicación de métodos sofisticados.

6.2 Análisis de la importancia de la Fibra Óptica

Se consideran trascendentes las siguientes ventajas y desventajas que presentan los sistemas de fibra óptica en el momento que se requiere para la implementación, se destacan a continuación:

Tabla 10.

Ventajas y Desventajas de la fibra óptica

Ventajas	Desventajas.
• Larga estabilidad de medición a lo largo del tiempo. • Bajo consumo energético. • Las fibras no pierden luz, por lo que la transmisión es también segura y no puede ser perturbada. • Capacidad para transmitir un gran número de señales.	• El coste es alto en la conexión de fibra óptica. • El coste de instalación es elevado. • Fragilidad de las fibras (Sensible a rupturas). • Dificultad de reparar un cable de fibras roto en el campo.

Fuente: Elaboración propia.

Con la aplicación de sensores de fibra óptica FBG en los nuevos y antiguos puentes hechos en Colombia, tendría el estado colombiano una herramienta eficaz para hacer seguimiento y control al cumplimiento de las especificaciones técnica de diseño y construcción, ya que el MSE de los

puentes podría detectar deflexiones y desplazamientos en etapas tempranas de construcción y no se recurriría a la exigencia de garantías después de entregada la obra, dando lugar de hacer las correcciones necesaria para el óptimo funcionamiento de los puentes.

6.3 Análisis de la estimación de costos de implementación de un sistema MSE en Colombia

Antes de cualquier implementación y exigencia contractual, los sistemas de monitoreo usados en la salud estructural y todos sus elementos constitutivos deben haber pasado por estudios e investigaciones que validen su eficiencia de acuerdo con su tipología, esto debe traducirse en normatividad que estandarice y regule la implementación del MSE, al mismo tiempo se deben demostrar claramente sus beneficios económicos.

Los propietarios (en este caso el estado y los constructores o concesionarios) podrían estar convencidos de los beneficios técnicos generales del MSE, reducción del riesgo, seguimiento y seguridad, además el reto que se tiene es poder sustentar su implementación desde un punto de vista económico, pero esto debe ir acompañado de unas normas técnicas que regulen, exijan y parametricen todas las señales y demás sistemas de emisión de información producto del monitoreo para poder tomar acciones preventivas o correctivas, de lo contrario y como se ha evidenciado sería infructuoso cualquier intento de implementación del MSE, que se les pueda hacer la exigencia a las concesionarias para que apliquen el monitoreo y además acaten lo señalado.

Haciendo un análisis de la implementación de sensores para monitoreo de puentes en el mundo y las diferentes necesidades de este se pueden determinar 3 escenarios base cuya implementación y costos varían:

Escenario 1: Monitoreo de la salud estructural durante la construcción y vida temprana del puente.

Los datos acá suministrados son determinados a partir de implementaciones de MSE en el mundo para tipologías similares o mucho más compleja que las colombianas.

Costo de implementación: Para un puente nuevo, la inversión inicial típica para un sistema de MSE oscila entre el 0,5% y el 3% del costo total de construcción. Esto incluye el hardware, la instalación y la configuración del sistema (Inaudi, 2011).

Beneficios para el caso colombiano. 1). Después de la implementación de un sistema de monitoreo con sensores de fibra óptica en un puente que fue concesionado y en la etapa de construcción se detecta un defecto de construcción, una deflexión excesiva, un asentamiento mayor al permisivo, una deformación de las secciones, el estado puede exigir al contratista una intervención para repararlo de manera inmediata a costo del mismo contratista, o el descubrimiento de daños dentro del período de garantía, por lo general 2 a 5 años. 2). Detectar rápidamente cualquier problema durante el proceso de construcción, de esta forma es más económico y fácil de corregir. El contratista puede corregir sin generar a futuro daños irreparables. Estas correcciones son muy costosas de implementar una vez que la obra se desmonta y se retira material de construcción.

Escenario 2: Monitoreo de la salud estructural de los puentes en su uso.

Costo de implementación: Durante los primeros 10 años en la vida de una estructura, tener un sistema SHM con sensores de fibra óptica instalado en un puente de tamaño mediano generalmente requerirá una inversión del orden del 2% al 5% del costo total de construcción. (Inaudi, 2011)

Beneficios para el caso colombiano: Los beneficios del monitoreo estructural con sensores de fibra óptica en los primeros años de construido se pueden reflejar de la siguiente manera: 1) La observación del comportamiento del puente durante los primeros 10 años de su vida útil

proporciona una excelente línea de base para comparar y evaluar su desempeño futuro. Para el estado colombiano y para la concesión un punto a favor en términos de inversión ya que corregir las anomalías a una edad temprana de la estructura siempre será más económico que tener que reemplazarla. 2) Genera eficiencia en las obras, teniendo en consideración que la reparación de un puente en condiciones de tránsito a menudo puede costar más que el costo de construcción original. Estos tipos de problemas a menudo se pueden detectar en los primeros 10 años de vida con la instrumentación y el análisis adecuados.

Escenario 3: Monitorear puentes existentes determinando deficiencias y candidatos para reemplazo.

Costo de implementación: un sistema de MSE que se instala sobre un puente existente donde se necesita evaluar su estado y la posibilidad de reemplazo por uno nuevo, debe implementar un sistema de monitoreo y de análisis de los datos de ingeniería y tiene un costo del **3%** del costo total previsto para la reconstrucción (Vanderzee, 2008).

Beneficios para el caso de Colombia. Este tipo de monitoreo en el caso particular colombiano es de suma importancia dada la cantidad de puentes existentes en el país a los cuales no se les ha hecho seguimiento para determinar el estado de estos y poder garantizar un desempeño funcional.

Algunos estudios sobre monitoreo con fibra óptica en puentes existentes adelantado por (Vanderzee, 2008) determinan lo siguiente:

1. Se ha logrado establecer que el 20% de los puentes monitoreados resultan estar en excelentes condiciones por lo que se descarta su demolición.
2. El 20% de los puentes monitoreados con fibra óptica pueden ser rehabilitados y su costo solo es el 60% del costo de un puente nuevo.

3. El 60% de los puentes intervenidos realmente necesitan ser reemplazados, para el caso colombiano, existe un gran inventario de puentes que deben ser analizados y determinar su estado actual.

6.4 Análisis del estado actual normativo para el monitoreo de puentes en Colombia

En Colombia, la implementación de un sistema de monitoreo para la salud estructural con sensores de cualquier naturaleza tiene un poco más de avance en edificaciones que en puentes. El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) regula lo relacionado a sensores o instrumentos sísmicos que permiten entre otras aplicaciones la medición de los periodos de vibración de la edificación sometida a un evento sísmico o la identificación de efectos de sitio causados por la amplificación de ondas sísmicas. Para sensores o instrumentación para puentes en Colombia, particularmente en lo que respecta a los sensores de fibra óptica para el monitoreo de puentes, no existen marco normativo que los regule, ni valide resultados, dicha validación debe hacerse con estándares internacionales.

Existe gran escasez de normas internacionales que regulen el uso de fibras ópticas como sensores utilizados en el monitoreo de salud estructural, dicha falencia está obstaculizando un avance de esta innovadora tecnología y el uso integral de los mismos. Las autoridades técnicas de todo el mundo han sido muy conservadores al aprobar sensores de forma rutinaria para aplicaciones relevantes de monitoreos, debido a la falta de normas que estandarice y regule, sin embargo, motivados por la demanda de varios sectores industriales, la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) ha creado una serie de manuales técnicos en relación con las fibras ópticas como sensores para el monitoreo estructural:

- IEC 61757-1:2012, Sensores de fibra óptica: especificaciones genéricas.
- IEC 61757-2-1, Sensores de fibra óptica: medición de tensión - Sensores basados en rejillas de Bragg.
- IEC 61757-3-1, Sensores de fibra óptica: Medición de temperatura - Detección distribuida.

Para Colombia, la implementación de sensores de fibra óptica para el monitoreo de puentes debe contar con una comisión técnica creada para establecer los primeros manuales técnicos donde se especifique la naturaleza de los mismos y los casos de aplicación, así mismo dicha comisión debe hacerse miembro de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) que armonice con lo adelantado por la IEC, y encontrar la tipología de sensores que más se adapten a los tipos de puentes existentes en Colombia.

7. Conclusiones

La revisión de la literatura sobre el monitoreo en salud estructural en puentes utilizando fibra óptica permitió conocer sobre el desarrollo y la creciente aplicación en la ingeniería civil, lo que conlleva a obtener una mejor apreciación y entendimiento de las fibras ópticas como sensores y sus ventajas frente a los sistemas eléctricos convencionales. Sin embargo, en la práctica para el monitoreo de puentes usando este tipo de tecnología se necesita más desarrollo y estudios dirigidos a un uso eficiente y normalizado a las diferentes tipologías de puentes.

Los sensores de fibra óptica poseen ventajas significativas sobre los sensores eléctricos equivalentes. Estas se caracterizan por realizar mediciones a largas distancias, muy importante para la aplicación en conexiones de distribución en una amplia zona geográfica, la interconexión de varios sensores en una sola fibra, la fibra óptica no requiere calibración, solo en su proceso de instalación, posee características de simplicidad en su manejo, son de bajo peso. Estas conexiones tienen una gran durabilidad y como aspecto trascendente, tienen un tiempo de respuesta corto en relación a sensores eléctricos. Los sensores (FBG) han ido ganando terreno en el campo del monitoreo estructural de puentes, principalmente por su aplicación y buenos resultados en pruebas de mediciones de deformaciones, desplazamientos y deflexiones, identificación del nivel de temperatura y vibraciones, todo esto, por medio de una serie de pruebas no destructivas, estáticas y dinámicas.

En Colombia no existe un marco normativo que regule o valide resultados de la implementación de un sistema de monitoreo para la salud estructural con sensores de cualquier naturaleza, o en particular los sensores de fibra óptica para el monitoreo de puentes. Se presenta una gran escasez de Normas Internacionales que regulen el uso de fibras ópticas como sensores utilizados en el

monitoreo de salud estructural, lo cual implica obstáculos al desarrollo tecnológico de su aplicación. Se deben desarrollar manuales técnicos de aplicación, regulación y validación de resultados de casos de aplicación que sirvan como guía para su implementación en nuevas obras.

Un futuro escenario en Colombia para la implementación de los sensores de fibra óptica como técnica de monitoreo de puentes, debe contar con una comisión técnica creada para establecer los primeros manuales técnicos donde se especifique la naturales y casos de aplicación, esta comisión técnica deberá estar conformada por expertos en la materia de instrumentación para el monitoreo, académicos y constructores. Esta comisión debe hacerse miembro de entidades internacionales que avalen su participación como la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) y que armonice con lo adelantado por la IEC.

Los sistemas de sensores convencionales todavía superan en uso a los sensores de fibra óptica, debido principalmente a dos aspectos. El primero es la falta de normalización de estos sensores. Incluso después de un creciente interés por la investigación de los sensores de fibra óptica y de unos resultados prometedores en este campo, no existen normas para la producción, estandarización, calibración y regulación por cualquier órgano gubernamental nacional ni internacional. El segundo es el alto costo de la implementación del sistema de monitorización con sensores FBG, disponibles actualmente en el mercado. Esto ha generado algunas dudas en el gremio de la ingeniería civil, para sustituir por completo los sensores de deformación convencionales por sensores FBG, como técnicas de monitoreo de la salud estructural.

Referencias bibliográficas

- Abdel-Jaber, H., & Glisic, B. (2016). Structural Health Monitoring Methods for the Evaluation of Prestressing Forces and Prerelease Cracks. *Frontiers in Built Environment*, 2(20), 1-9. Obtenido de <https://doi.org/10.3389/fbuil.2016.00020>
- Agencia Nacional de Infraestructura [AIN]. (2018). Proyectos de Infraestructura - Carreteras | Portal ANI. Retrieved August(22). Obtenido de <https://www.ani.gov.co/proyectos-de-infraestructura-carreteras>
- Alan, R. (1999). Distributed optical-fibre sensing. *Measurement Science and Technology*, 10(8), R75–R99. Obtenido de <https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/8/201>
- Alavi, A. H., & Buttlar, W. G. (2019). An overview of smartphone technology for citizen-centered, real-time and scalable civil infrastructure monitoring. *Future Generation Computer Systems*, 93, 651-672.
- Alokita, S., Rahul, V., Jayakrishna, K., Kar, V., Rajesh, M., Thirumalini, S., & Manikandan, M. (2019). Recent advances and trends in structural health monitoring. En J. Mohammad, T. Mohamed, & S. Naheed, *Structural Health Monitoring of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. s.l.: Woodhead Publishing.
- Ambher. (2014). *Monitoreo de puentes con fibra óptica*. Obtenido de <https://www.ambher.com/monitoreo-de-puentes-con-fibra-optica>
- An, Y., Kim, M., & Sohn, H. (2014). Piezoelectric transducers for assessing and monitoring civil infrastructures. En M. Wang, J. Lynch, & H. Sohn, *In Sensor Technologies for Civil Infrastructures* (págs. 86-120). Woodhead Publishing.

- Ansari, F. (1997). State-of-the-art in the applications of fiber-optic sensors to cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 19(1), 3–19. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00038-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00038-8)
- Balageas, D., Fritzen, C., & Güemes, A. (2006). *Structural Health Monitoring*. Hermes Science Publishing. London: ISTE.
- Boquera, M. (2005). *Comunicaciones ópticas*. Madrid: Díaz de Santos S.A.
- Bureau Securitas. (1996). Proven & effective security and emergency response solutions. Retrieved August(20). Obtenido de <http://www.bureausecuritas.com/>
- Calavera, R. (1996). *Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado*. INTEMAC Instituto Técnico de Materiales y Construcciones.
- Crespo, S., Hernández, F., Carrión, V., Quintana, R., Rodríguez, N., & Gasca, Z. (2014). *Plataforma para el análisis y visualización de señales para el monitoreo remoto de estructuras*. Instituto Mexicano de Transportes: Sanfandila.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (13 de mayo de 2019). *Indicador de Inversión en Obras Civiles (IIOC). I trimestre de 2019*. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/obras/bol_obr_civi_Itrim19.pdf
- Federicia, F., Alesii, R., Colarieti, A., Faccio, M., Graziosi, F., Gattulli, V., & Potenza, F. (2014). Design of Wireless Sensor Nodes for Structural Health Monitoring. *EUROSENSORS*, 87, 1298 – 1301.
- Fernández, H., Meré, J., De Pisón, A., González, A., Alba, F., Lostado, R., & Pernía, A. (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*. (26). Madrid, España: Universidad de La Rioja. Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/260265697_Redres_Inalambricas_de_sensores_teorla_y_aplicacion_practica

Frövel, M. (2006). *Sensores de fibra óptica tipo redes de Bragg embebidos en material compuesto para medir deformaciones y temperaturas criogénicas*. Universidad Politécnica de Madrid. s.l.: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Obtenido de http://oa.upm.es/459/1/MALTE_FROVEL.pdf

Garita, C. (2016). Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes. *Tecnología en marcha*, 29(1), 96-107.

Giurgiutiu, V. (10-12 de octubre de 2005). Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors. *16th International Conference of Adaptive Structures and Technologies ICAST-2005*,. París, France. Obtenido de http://www.me.sc.edu/research/lamss/pdfnew/CONFERENCES/C125_ICAST-2005_10.pdf

Glisic, B., & Inaudi, D. (2007). *Fibre optic methods for structural health monitoring amazon (John Wiley)*. s.l.: Wiley.

González, C. (2001). *La tecnología de los sensores de fibra óptica*. Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolas de los Garza, España: Facultad de Ingeniería Mecánica.

Grattan, K. T., & Meggitt, B. T. (1995). *Optical fiber sensor technology* (Vol. 1). (K. T. Grattan, & B. T. Meggitt, Edits.) London: Chapman & Hall.

Grupo Cofitel. (2015). *Sensores de fibras FBG (Fiber Bragg Gratting)*. Obtenido de <https://www.c3comunicaciones.es/Fichas/SENSORES%20Y%20FBG%20es.pdf>

- Hobbs, D. W. (2001). Concrete deterioration: causes, diagnosis, and minimising risk. *International Materials Reviews*, 46(3), 117-144. doi:<https://doi.org/10.1179/095066001101528420>
- Inaudi, D. (2009). *Structural health monitoring of bridges: general issues and applications*. Obtenido de <https://doi.org/10.1533/9781845696825.2.339>
- Inaudi, D. (2009). Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems. *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 339–370. Obtenido de <https://doi.org/10.1533/9781845696825.2.339>
- Inaudi, D. (2011). Cost-benefits analysis in SHM projects. *5th international conference on structural health monitoring of intelligent infrastructure*(5), 11-15. Obtenido de <https://ishmii.org/wp-content/uploads/2013/01/inaudi.pdf>
- Kane, M., Peckens, C., & Lynch, J. (2014). Design and selection of wireless structural monitoring systems for civil infrastructures. En M. Ming L. Wang, J. Lynch, & H. Sohn, *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*. (págs. 446-479). Woodhead Publishing. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2016.10.037>
- Kesavan, K., Ravisankar, K., Parivallal, S., Sreeshylam, P., & Sridhar, S. (2010). Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete. *Measurement*, 43(2), 157–163. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2009.08.010>
- Khadour, A., & Waeytens, J. (2018). Monitoring of concrete structures with optical fiber sensors. In *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*. Woodhead Publishing, 97-121. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00005-8>

- Lee, S. S. (2010). Piezoelectric transducer self-diagnosis under changing environmental and structural conditions. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 57(9), 2017-2027.
- Ley N°38, Ley de Ordenación de la Edificación, Bogota, Colombia; 5 de noviembre de 1999
- Lui-Kuan, Y., & Agüero, P. (2017). Introducción al monitoreo de la condición estructural de puentes. *LanammeUCR*, 2(5), 1-13.
- Maierhofer, C., Arndt, R., Röllig, M., Rieck, C., Walther, A. S., & Hillemeier, B. (2006). Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 28(4), 393–401.
- Majumder, M., Gangopadhyay, T., Chakraborty, A., Dasgupta, K., & Bhattacharya, D. (2008). Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147(1), 150–164. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424708002380>
- Malacara, D. (2015). *Óptica básica*. México: Fondo de cultura económica.
- Marulanda, J., Thomson, P., & Marulanda, J. (2011). Monitoreo de salud estructural. *Ingeniería y Competitividad*, 2(2), 40-46.
- Meggitt, B. (2003). Fiber optics in sensor instrumentation. *Instrumentation Reference Book*, 170–199. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/B978-075067123-1/50016-8>
- Meo, M. (2014). Acoustic emission sensors for assessing and monitoring civil infrastructures. *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*. Woodhead Publishing, 1, 159–178. doi:<https://doi.org/10.1533/9780857099136.159>

- Micron Optics. (julio de 2008). *Sapgyo Great Bridge Long-term monitoring of a bridge structure South Korea*. Obtenido de http://www.micronoptics.com/wp-content/uploads/2016/09/MicronOptics-Sapgyo_Grand_Bridge_2008.pdf
- Micron Optics. (Septiembre de 2016). *Case Study Bridges Structural monitoring of the Manhattan cable stayed bridge Manhattan, New York*. Obtenido de MicronOptics-ManhattanBridge_2005-2007: http://www.micronoptics.com/wp-content/uploads/2016/09/MicronOptics-ManhattanBridge_2005-07.pdf
- Muñoz, E., & Gómez, D. (2013). Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia. *Ingeniería de Construcción*, 28(1), 37-62.
- Navarro, F. (2014). Sensores de fibra óptica FBG para el monitoreo de la salud estructural de los puentes. *Tecnología en Marcha*, 27(4), 3-13.
- Poursaee, A. (2014). 13 - Corrosion sensing for assessing and monitoring civil infrastructures. En M. Wang, J. Lynch, & H. Sohn, *Sensor Technologies for Civil Infrastructures* (Vol. 1, págs. 357-382). Woodhead Publishing. doi:<https://doi.org/10.1533/9780857099136.357>
- Rytter, A. (1993). *Vibrational based inspection of civil engineering structures*. Aalborg University: Dept. of Building Technology and Structural Engineering, . Obtenido de <https://vbn.aau.dk/en/publications/vibrational-based-inspection-of-civil-engineering-structures>
- Serov, A. (2017). Cognitive sensor technology for structural health monitoring. *Procedia Structural Integrity*, 5, 1160-1167.
- Sohn, H., Farrar, C., Hemez, F., & Czarnecki, K. (2004). *A Review of Structural Health. A review of structural health monitoring literature: 1996–2001*. Obtenido de

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=43453048A5725D068F53552AE67579DB?doi=10.1.1.729.3993&rep=rep1&type=pdf>

Sumitro, S., Okamoto, T., & Inaudi, D. (2004). Intelligent sensory technology for health-monitoring-based maintenance of infrastructures. En *Smart Structures and Materials 2004: Smart Sensor Technology and Measurement Systems*, (Vol. 5384, págs. 131-142). San Diego: United States.

Sunaryo, S., Okamoto, T., & Inaudi, D. (27 de July de 2004). *Intelligent sensory technology for health-monitoring-based maintenance of infrastructures* (E. Udd & D. Inaudi, Eds.). Obtenido de <https://doi.org/10.1117/12.541290>

Sundaram, B., Kesavan, K., Parivallal, S., Ahmed, A., & Ravisankar, K. (2011). Monitoring of FRP strengthened concrete structures using FBG sensors. *Procedia Engineering*, 14, 1549-1556. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.195>

Tae, M. K., Do-Hak, K., Moon, K. K., & Yun, M. L. (2016). Fiber Bragg grating-based long-gauge fiber optic sensor for monitoring of a 60 m full-scale prestressed concrete girder during lifting and loading. *Sensors and Actuators A: Physical*, 252, 134-145. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.10.037>

Taheri, S. (2019). A review on five key sensors for monitoring of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 204, 492-509.

Torres, B. (2012). *Definición de las pautas y condiciones de monitorización, encapsulado y fijación de sensores de fibra óptica para la medida de deformación y temperatura en estructuras*. España: Universitat Politècnica de València.

Torres, G. B. (2011). Estudio Experimental de Sensores ópticos Tipo FBG para medir deformaciones Temperaturas en estructuras. (Tesina de Master de la Universidad

Politécnica de Valencia). Obtenido de
<https://riunet.upv.es/handle/10251/14022?show=full>

Unidad de Puentes. (2013). *Monitoreo y evaluación estructural de puentes utilizando un sistema de instrumentación inalámbrico*. Obtenido de
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/202/LM-PI-UP-02-2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Vanderzee, P. (2008). A better way to fix our national bridge problem. *Lifespan Technologies*(2). Obtenido de <https://lifespantechnologies.com/white-papers/white-paper-2>

Wang, M., & Wang, G. (2014). Electromagnetic sensors for assessing and monitoring civil infrastructures. *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*. Woodhead Publishing, 1, 238-264. doi:<https://doi.org/10.1533/9780857099136.238>

Wen, H., Quan, W., & Ser, T. (2010). Applications of Piezoelectric Materials in Structural Health Monitoring and Repair: Selected Research Examples. *Materials*, 3(12), 5169-5194. doi:<https://doi.org/10.3390/ma3125169>

Yuyama, S., Ohtsu, M., & Kishi, T. (2000). *Acoustic Emission-beyond the Millennium*. Elsevier Science.

Zhanpeng, L., & Wu, Y. (2008). In situ monitoring the effects of a magnetic field on the open-circuit corrosion states of iron in acidic and neutral solutions. *Corrosion Science*, 50, 510–522.