

# 1. ANTECEDENTES

## 1.1 Fibras ópticas aplicadas a estructuras de concreto: Estado del Arte

En esta sección se tratará ampliamente las características físicas y funcionales que tienen los sensores de fibra óptica en comparación con sensores eléctricos convencionales. Se describirá el funcionamiento y desempeño de los sensores de rejillas de Bragg para el monitoreo de estructuras de concreto en base a diferentes artículos científicos. También se abordarán las técnicas de evaluación destructivas y no destructivas que son utilizadas comúnmente para la detección y cuantización de defectos internos y degradaciones. Se hará un especial énfasis en técnicas no destructivas aplicadas a estructuras de concreto.

### **Ventajas de los sensores de fibra óptica:**

- 1) Son pequeños normalmente con un diámetro total de 125 [ $\mu\text{m}$ ] o menor, resultando un sensor muy delgado que puede ser enterrado en diferentes compuestos sin cambiar sus propiedades mecánicas.
- 2) Los sensores de fibra óptica pueden ser elaborados para soportar condiciones de medio ambiente asociadas a temperatura y presión.
- 3) El vidrio de la fibra es un elemento dieléctrico pasivo, habilitándolos para usos en materiales de compuesto orgánico como epoxi carbón y termoplástico donde las descargas eléctricas son un peligro. Las propiedades pasivas naturales de estos sensores también les permiten ser enterrados en estructuras metálicas satisfactoriamente.
- 4) Muchos sensores de fibra óptica pueden ser elaborados con un alto grado de inmunidad a interferencia electromagnética eliminando costos y la necesidad de una voluminosa capa de protección.

## Antecedentes

---

- 5) Los sensores de fibra óptica pueden ser multiplexados de tal forma que muchos sensores pueden ser tendidos en una sola línea de fibra óptica.
- 6) Hay un alto grado de sinergia entre los sensores de fibra óptica y las telecomunicaciones así como la industria optoelectrónica y los continuos beneficios en la mejora de los dispositivos y la reducción de los precios. [1]

En los últimos años una serie de técnicas no destructivas se han desarrollado y mejorado para el monitoreo de estructuras de concreto, algunas de ellas son: escaneo por ultrasonido, emisión acústica (AE), termografía infrarroja estimulada (SIT), pruebas de vibración, radar, conductividad, etc. Estas técnicas son ampliamente utilizadas y acondicionadas para diferentes aplicaciones sin embargo, no son las más apropiadas para el monitoreo de estructuras en servicio debido a la dificultad de implementación en el lugar [2].

El reto es desarrollar nuevas técnicas que puedan medir el estado de salud de las estructuras en servicio y además en tiempo real. Materiales y estructuras inteligentes dan esa posibilidad. En específico, los sensores de fibra óptica (FOS) son una tecnología facultada que permite a los ingenieros agregar un sistema nervioso central a sus diseños, detectando daños y monitoreos de estado.

La implementación de sensores de rejillas de Bragg (FBG) para pruebas no destructivas en estructuras de aluminio, estructuras de hormigón y para usos en materiales de compuesto orgánico como epoxi carbón y termoplástico han mostrado un buen desempeño y correlación de resultados con los sensores clásicos convencionales. [2]

## 1.1.1 Sistemas de Protección

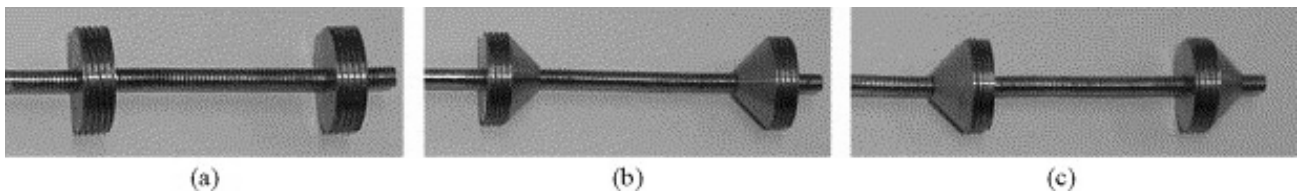
### Concepto de sistema de protección para sensores de fibra óptica

La vulnerabilidad de los sensores de fibra óptica hace difícil protegerlos de la masa de concreto en el proceso de vertido. Por lo tanto, los FOS pueden ser fácilmente dañados y corroídos en aplicaciones prácticas de largo tiempo. Por esta razón la implementación de sensores de fibra óptica en estructuras de concreto son muy limitadas.

El primer requerimiento es la protección de la fibra de sílice ante el ambiente alcalino y la protección del arreglo de sensores:

- a) Durante el proceso de vertido del concreto
- b) Contra daño mecánico o abrasivo causado por el agresivo ambiente químico.

El aspecto más importante del sistema de protección (SP) es la eficiencia asociada a la transferencia de tensión de la estructura a la región sensada.



*Figura 1.1 Tipos de Sistemas de protección*

Normalmente, los FOS son cubiertos por capas de acero, tubo de acero y caucho de silicona.

La figura 1.1 muestra una serie de Sistemas de Protección de diferentes formas y tamaños de pestañas. La eficiencia de cada sistema en términos de la transferencia de tensión entre el sensor y el material de concreto es diferente. [3]

## 1.2 Sensores de Rejillas de Bragg

Usualmente las rejillas pueden ser fabricadas en fibras ópticas monomodo dopadas de germanio empleando una fuente láser ultravioleta de 240 – 280 [nm]. La tecnología de fabricación incluye el método interferométrico, método phase mask, método punto a punto, etc.

Las rejillas de Bragg pueden llegar a tener una longitud de 1 – 20 mm. Cuando una luz incidente ilumina las rejillas de Bragg, una porción de la luz incidente es reflejada y la demás es transmitida. Básicamente, el principio del sensor con rejillas de Bragg está basado en la medición de la variación de la longitud de onda de la señal reflejada, la cual es la longitud de onda central desde la rejilla de Bragg y depende del índice de refracción efectivo del núcleo y la periodicidad de la rejilla. De acuerdo con la condición de Bragg, la longitud de onda de Bragg puede ser expresada como:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$

Donde  $\lambda_B$  es la longitud de onda de Bragg,  $\Lambda$  es el periodo de las rejillas,  $n_{\text{eff}}$  es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra. Así, la longitud de onda de Bragg puede cambiar al modificar cualquiera de los dos parámetros  $n_{\text{eff}}$  ó  $\Lambda$ .

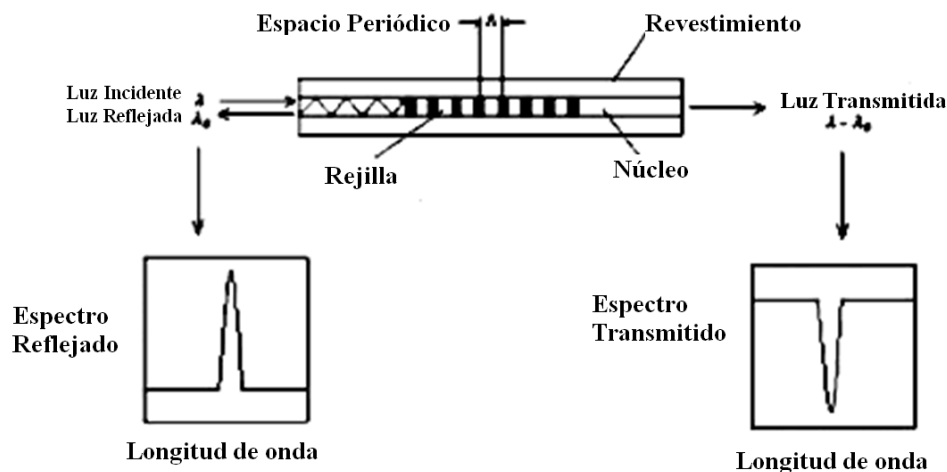


Figura 1.2 Rejilla de Bragg

## Antecedentes

---

Cuando una deformación mecánica o térmica es aplicada a la región donde se encuentra la rejilla de Bragg, el índice de refracción efectivo así como la periodicidad de las perturbaciones cambian. La variación de la longitud de onda de Bragg en función del cambio de tensión axial ( $\Delta\varepsilon$ ) y el cambio de temperatura ( $\Delta T$ ) puede ser expresada de la siguiente forma [2]:

$$\Delta\lambda_B = \alpha\Delta\varepsilon + \beta\Delta T$$

En donde:

$\alpha$  es una constante que indica la sensibilidad en deformación de la rejilla, se obtiene de forma experimental. Puede ser cuantificada de la siguiente forma:

$$\alpha = \lambda_B (1 - \rho_e); \quad \rho_e = \text{es una constante strain-óptica efectiva}$$

$\beta$  es una constante relacionada con la sensibilidad de longitud de onda y temperatura:

$$\beta = \lambda_B (\alpha_\Lambda + \alpha_n); \quad \alpha_\Lambda = \text{es el coeficiente de expansión térmico de la fibra}$$

$\alpha_n = \text{es el coeficiente termo-óptico.}$

Normalmente las variaciones de temperatura ( $\Delta T$ ) durante las pruebas y ensayos no son significativas, debido tanto a las condiciones del lugar como a los tiempos de medida, por lo que el factor puede ser despreciado. Así, al enterrar sensores Bragg dentro de estructuras de concreto es posible cuantificar la deformación o strain ocasionada por los ensayos no destructivos. [2]

### **1.3 Técnicas de evaluación no destructivas (END)**

También conocidos como evaluación o examen no destructivo, los ensayos no destructivos incluyen varios métodos para examinar materiales, componentes y conexiones destinadas a identificar y cuantificar defectos internos y degradaciones. Técnicas comunes empleadas incluyen radiografía, ultrasonidos, tintes penetrantes y partículas magnéticas.

Son técnicas de inspección que se utilizan para la detección y evaluación de las posibles discontinuidades que puedan existir tanto en la superficie como en el interior de los materiales metálicos ( placa rolada, material forjado, piezas de fundición, soldadura, etc.) que se emplean para la fabricación de recipientes sujetos a presión, tanques atmosféricos, válvulas, árboles, cabezales, tubería, etc.; a estas técnicas se les llama pruebas no destructivas porque al aplicarlas, los materiales no se destruyen ni se ven afectadas sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y/o características dimensionales [5].

#### **1.3.1 Aplicación de los métodos de ensayos no destructivos**

Los métodos de ensayos no destructivos permiten obtener información de piezas o partes de una estructura metálica o no metálica, sin alterar sus condiciones de utilización o aptitud de servicio; es decir no provocan daños en el material, ni perjudican o interfieren con el uso futuro de las piezas o partes inspeccionadas.

A partir de esta definición se puede observar que ensayos aplicados sobre determinadas piezas se consideran destructivos, ya que alteran sus condiciones, pero aplicados sobre otras piezas, se consideran no destructivos.

Un ejemplo es la determinación de dureza. Si lo hacemos sobre una superficie que requiere una terminación muy buena, la marca será inaceptable, en cambio si lo hacemos sobre el domo de una caldera, la marca no tendrá influencia alguna en el uso futuro de la caldera.

## Antecedentes

---

Ahora bien, si realizamos una medición de dureza mediante un método no destructivo, no alterará las condiciones en ambos casos.

De igual manera se puede decir, que si se aplica un método de END empleando un procedimiento inapropiado, puede generar condiciones que provoque daños en las piezas inspeccionadas, un ejemplo de ello es aplicar líquidos penetrantes inapropiados en el control de piezas de acero inoxidable austenítico.

Los métodos de END se aplican en diferentes etapas del proceso productivo, pudiendo ser estas, el control de materia prima, durante el proceso de fabricación, así como en el ensayo final del producto y control en servicio.

Si hacemos una comparación con los métodos de ensayos destructivos, se puede decir que éstos, aplicados a un control de calidad estadístico, permiten comprobar con un cierto grado de seguridad, el nivel de calidad de una producción.

Sin embargo requieren la inutilización de un determinado número de muestras, obtienen datos de una zona de la pieza y no pueden asegurar la calidad de todos los elementos de un lote.

En cambio, los métodos de END, permiten el control del 100 % de una producción y pueden obtener información de todo el volumen de una pieza, con lo que contribuyen a mantener un nivel de calidad uniforme, con la consiguiente conservación y aseguramiento de la calidad funcional de los sistemas y elementos.

Además colaboran en prevenir accidentes, ya que se aplican en mantenimiento y en vigilancia de los sistemas a lo largo del servicio.

### **1.3.2 Métodos de ensayos no destructivos en estructuras de concreto**

En las siguientes secciones se describen algunas de las técnicas de ensayo no destructivo para determinar el estado de los materiales de construcción y la integridad de las estructuras de las que forman parte.

La búsqueda de métodos de ensayo no destructivo para analizar el estado de las estructuras de hormigón se remonta a tiempos muy lejanos en la historia (sencillas técnicas de inspección visual o acústica han sido utilizadas durante siglos).

Sin embargo, las técnicas con mayor potencial de uso en la actualidad, fueron introducidas hacia 1950, cuando el estudio de los fenómenos relacionados con la propagación de ondas en sólidos despejó horizontes para el avance de estos métodos.

En los últimos años, la aplicación práctica de los END se ve favorecida por los siguientes factores:

- Desarrollo de nuevos programas informáticos de cálculo (simulación por elementos finitos) y tratamiento de imágenes.
- Aparición de tarjetas de memoria de pequeño tamaño.
- Desarrollo de Internet como herramienta para la difusión de los conocimientos científicos y de los resultados de investigaciones.
- Miniaturización de los equipos de medida.

Algunos campos de trabajo abiertos son:

- Posibilidades de aplicación combinada de varias técnicas.
- Interpretación de los resultados de los ensayos, aun por operarios no expertos.
- Concretar la influencia de distintas variables sobre el desarrollo de los ensayos.
- Verificación de técnicas en estructuras reales.
- Normalización de ensayos.



## **Ensayos no destructivos en hormigón**

Los métodos de END presentan gran interés para la industria de la construcción de cara a la realización de estudios rápidos y baratos sobre la durabilidad y calidad del hormigón en una estructura.

En la actualidad, el control de calidad de las estructuras de hormigón se realiza habitualmente mediante ensayos destructivos, pero la extracción de probetas en determinados edificios no siempre es posible o práctica.

A los problemas genéricos de aplicación derivados de la difícil interpretación de resultados, la falta de una normativa, la desconexión entre investigación y aplicación comercial y la competencia entre los distintos métodos por un uso exclusivo, hay que añadir otros derivados de la variada composición o porosidad de los hormigones, el cambio de sus propiedades con el tiempo y la influencia de factores exógenos que dificulta la obtención de ecuaciones de correlación y en definitiva la interpretación de resultados.

### **1.3.2.1 Técnicas basadas en la propagación de ondas**

#### ***Descripción y fundamento del método:***

Se basan en la propagación a través del hormigón de ondas ultrasónicas longitudinales no perceptibles por el oído humano (20 [Hz]-20 [kHz]), procedentes de un emisor o generador de impulsos (palpador electroacústico). El pulso es captado por un receptor que lo transforma en un impulso eléctrico. Un circuito tiempo permite determinar la velocidad de propagación de la onda [6].

Aplicaciones:

- Medida de uniformidad del material en una estructura.
- Medida del grosor de una capa de hormigón (suelo, forjado, etc.).
- Monitorización en el tiempo de cambios en las propiedades del hormigón.
- Evaluación de sistemas estructurales / Detección de defectos.

## Antecedentes

---

- Medida de la resistencia o del módulo de deformación del hormigón.
- Estudio del proceso de fraguado del hormigón.

Investigaciones recientes:

- Modelos de simulación por elementos finitos.
- Búsqueda de fuentes de ondas moduladas por excitación piezoeléctrica.
- Métodos basados en la reflexión del sonido (Eco-impacto y Eco-pulso):

Esta técnica fue desarrollada en el U.S.National Bureau of Standards en los años 80.

Un pulso de ondas acústicas generadas por un transmisor (Eco-pulso) o un golpe mecánico (Eco-impacto) se propaga a través del hormigón experimentando reflexiones ante los cambios en densidad o módulo elástico. Las ondas reflejadas o "ecos" se convierten en señales eléctricas para ser analizadas mediante un osciloscopio.

Aplicaciones de los métodos basados en la reflexión de ondas acústicas:

- Identificación y cuantificación de grietas u oquedades que se sospechan en una estructura de hormigón (control de calidad de la edificación).
- Medidas del espesor de elementos de hormigón (pavimentos, solados, paredes, forjados, etc.) con errores inferiores al 3%.
- Localización de armaduras, tuberías o conductos en elementos de hormigón.

Investigaciones llevadas a cabo en los últimos años

- Desarrollo de software para la monitorización de resultados (localización de defectos) mediante imágenes on-line.
- Aplicaciones comerciales automatizadas (movimiento mecanizado de transductores, control de presión, interpretación de resultados).
- Métodos basados en la propagación de ondas electromagnéticas (RADAR):

Técnica basada en la propagación y reflexión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia (300 MHz – 2.5 GHz).

### ***Aplicaciones***

- Localización de grandes oquedades.
- Determinación de humedades en edificios.
- Detección de armaduras.
- Determinación del contenido de agua en el hormigón fresco.
- Estudio de pavimentos.

### **1.3.2.2 Emisión acústica**

#### ***Fundamento***

Consiste en detectar la energía liberada en forma de ondas elásticas durante los procesos de agrietamiento de un material.

Las señales recibidas, se analizan por métodos analógicos o digitales.

#### ***Aplicaciones***

- Detección de fisuras producidas a causa de fenómenos térmicos durante el fraguado del hormigón, para poder tratarlas de una forma inmediata.
- Estudio y desarrollo de nuevos materiales cementantes.
- Estudio de la fisuración producida en el hormigón por los ciclos de hielo/deshielo.
- Estudio y monitorización de grietas activas.
- Localización preventiva de puntos de fractura.

### 1.3.2.3 Termografía por infrarrojos

Se trata de un método térmico, basado en el principio de la conductividad térmica o capacidad para transmitir calor de los materiales. Se utiliza una cámara sensible a la radiación infrarroja que permite captar el flujo de energía emitido por una superficie y transformarlo inicialmente en una señal eléctrica y posteriormente en imágenes.

#### Aplicaciones

- Diagnóstico de paredes ocultas bajo frescos o pinturas.
- Detección de elementos ocultos (conducciones, armaduras etc.)
- Detección de humedades.
- Detección de defectos de un determinado tamaño en estructuras de hormigón, basándose en el diferente comportamiento térmico del aire y el hormigón.

## Antecedentes

### 1.4 Cuadro Resumen sobre END utilizados en hormigón

En la siguiente tabla se realiza una compilación sobre las principales técnicas utilizadas para el ensayo no destructivo de estructuras de hormigón:

*Tabla 1.1 Resumen de END*

Método	Aplicaciones	Fiabilidad	Portabilidad equipos	Destreza operario	Dificultad interpretación datos
Velocidad ultrasonidos	1,3,4,5	MEDIA	SÍ	MEDIO	MEDIO
Pulso – Eco	1	M / ALTA	SÍ	ALTO	ALTO
	4	ALTA			
	6	ALTA			
	7	MEDIA			
Radar	1	DUDOSA	SÍ	ALTO	ALTO
	4	MEDIA			
	6	ALTA			
	7	M / ALTA			
Termografía de Infrarrojos	7	MEDIA	SÍ	MEDIO	MEDIO
	8	ALTA			
Emisión acústica	2	¿?	SÍ	ALTO	ALTO
Aplicaciones:					
1. Detección de grietas 2. Evolución de grietas en el tiempo 3. Detección de capas de hormigón dañadas		4 Presencia de oquedades 5 Propiedades elásticas del hormigón		6 Medida de grosores 7 Localización de armaduras y/o conducciones 8 Detección de humedades	

### **Conclusiones**

Son muchas las ventajas que presentan los sensores basados en fibras ópticas en comparación con los utilizados tradicionalmente, principalmente por su tamaño e inmunidad provocado por interferencia electromagnética.

Los sensores de fibras ópticas pueden ser protegidos durante el vertido y ante los agregados del concreto utilizando sistemas de protección. El aspecto más importante de un sistema de protección es la eficiencia asociada a la transferencia de tensión entre la estructura y la región sensada.

Las técnicas no destructivas tienen como finalidad evaluar propiedades materiales antes de que resulten fallidas, asegurando el nivel de calidad y el funcionamiento del producto durante su producción o servicio. También son usadas extensivamente para determinar el estado de salud de las estructuras ingenieriles como puentes, presas, rascacielos etc.

Gracias a éste análisis la técnica más conveniente para los experimentos con las muestras de hormigón es la técnica destructiva, en específico, para éste trabajo de tesis se lleva a cabo el ensayo de compresión, el cual estudia el comportamiento de un material sometido a una fuerza de compresión progresivamente creciente hasta conseguir la rotura o aplastamiento.

Si bien, las técnicas destructivas se distinguen por un muestreo y sacrificio del producto para valorar el nivel de calidad, se infiere que si los resultados son exitosos o, en su defecto, erróneos, el resto de la producción está igual de bien o mal. La variabilidad del proceso en estas condiciones se considera muy baja.

**Bibliografía**

[1] Eric Udd, “Fiber Optic Smart Structures”, Proc. IEEE, vol. 84, p. 60, 1996.

[2] J.S. Leng, A. Asundi. “Non-Destructive evaluation of smart materials by using extrinsic Fabry-Perot interferometric and fiber Bragg grating sensors”, NDT&E Int 2002; 35: p. 273-276.

[3] J.S. Leng, R. A. Barnes, A. Hameed, D. Winter, J. Tetlow, G.C. Mays, G. F. Fernando, “Structural NDE of concrete structures using protected EFPI and FBG sensors”, sensors and actuators 2006; 126: p. 340-347.

[4] Henry Zanger, Cynthia Zanger, “Fiber Optics Communication and others applications”, Macmillan publishing Company, USA, 1991.

[5] Surendra P. Shah, Kolluru V. Subramaniam & John S. Popovics, “Use of Nondestructive Ultrasonic Techniques for Material Assessment and in-Service Monitoring of Concrete Structures”, NDT.net, Vol. 5, No. 02, 2000.

[6] Álvarez M.; González T., "Estudio del método de la medida de la velocidad de propagación del sonido y su aplicación a edificios históricos" – Ingeniería Civil/94, 1994.