

Monitoreo de salud estructural

Conceptos. Aplicación del sistema de salud estructural.

Conceptos

Del monitoreo de salud estructural

El *monitoreo de salud estructural* (Structural Health Monitoring, SHM, en inglés) es una tecnología que combina la captura de datos de una estructura con el análisis de la misma. Los datos se consiguen desde una red sensorial no destructiva, desde la cual se obtienen indicadores que permiten detectar anomalías (daños o degradación) en la estructura. Esta información puede ser periódica o en tiempo real y continuo, y estar asociada a cambios diversos como deterioro, corrosión, fatiga, reacciones químicas, humedad, cambios en las variables del ambiente, así como a las propiedades físicas relativas a la carga, esfuerzos, desplazamientos, deformaciones, aceleraciones, agrietamiento, vibraciones, dislocaciones y otros que sean necesarios para la *evaluación operacional de la estructura*. Esta evaluación demanda contrastar la situación de la estructura con un perfil saludable de la misma. Intermedia este contraste, el análisis que debe hacerse a la estructura a partir de la información captada por los sensores.

El campo del monitoreo de salud estructural es amplio y se desarrolla y aplica con intensidad en las ingenierías aeronáutica, civil y mecánica, principalmente, aunque también hay avances en otras como en la eléctrica y la electrónica, por ejemplo. En el campo de la ingeniería civil ya se aplican a estructuras flexibles como puentes, edificios altos, o estadios, también en reservorios y túneles así como en edificaciones valiosas antiguas.

Del monitoreo de salud estructural pueden distinguirse las siguientes etapas, la mismas que variarán dependiendo de la estructura en estudio.

➤ *Razones y variables para la evaluación operacional*

El tipo y la importancia de la estructura así como el de las solicitaciones a las que está sometida, justifican que se establezca el monitoreo de salud estructural (por razones económicas, estratégicas, de seguridad u otras).

La selección de variables por captar y estudiar está ligada a conocer el o los posibles daños que puede sufrir la estructura (teniendo claridad en la importancia de los mismos), así como las condiciones operativas o ambientales que podrían determinarlos.

Hay que considerar también, la posibilidad y limitaciones tanto para medir como para monitorear las variables seleccionadas. Ello incluye las facilidades tecnológicas así como las necesidades de frecuencia de la medición.

➤ *Adquisición y gestión de datos*

En esta parte se reconocen o determinan los métodos de activación o estímulo, los tipos de sensores más apropiados (su capacidad y técnicas de adhesión o embutido, o de prueba), así como su número y disposición

espacial. Hay que tomar en cuenta el hardware apropiado para adquirir, almacenar y transmitir los datos, así como la periodicidad de estas tareas.

En esta etapa hay que tomar en cuenta la necesidad de *normalizar los datos*. Esto es, reconocer que las diversas mediciones pueden provenir, por ejemplo, de condiciones ambientales diversas, y en tal caso no serían directamente comparables. La base de la normalización está en averiguar las causas de variabilidad de la información, y en el caso del monitoreo, el separar aquellas propias del daño que se quiere estudiar de otras calificables de *ruidos* para el sensor. También se distinguen ruidos evitables o controlables (o estadísticamente cuantificables), de aquellos no predecibles.

También es necesaria una *limpieza de datos*. Filtros que ayuden a determinar los datos que serán transmitidos, desde las visitas y formas para comprobar que algún sensor esté o no funcionando bien, a la aplicación de técnicas de procesamiento de señales.

➤ *Identificación de antes y después del daño*

Debe estar claro si el dato que se transmite corresponde a la estructura sana o dañada. Los rasgos del dato que lo caracterizan en una u otra situación. Ello es variable dependiendo de la estructura y de la sollicitación. Por ejemplo, para el análisis dinámico serán verificables las variaciones en la amplitud y en la frecuencia. Otros serán los casos relacionados con la fractura o la temperatura.

En la gestión de datos es importante considerar la *compresión* de los mismos. Esta es una técnica recomendable para el caso de muchas variables o datos por periodos largos.

Finalmente en esta etapa se considerará la *calidad* de los datos, pudiendo utilizarse pruebas de significancia estadística.

➤ *Cuantificación del daño*

El sistema de monitoreo debe dar lugar a una información cuantificada de la magnitud del daño. Se trata de uno o más algoritmos que incluso pueden estar asociados a sistemas de aprendizaje para conocer mejor si la estructura está dañada o no.

➤ *Modelos estructurales*

En la literatura se les cita como parte del sistema de monitoreo. Se trata de modelos de análisis que utilizan la información básica de la estructura (geométrica y constitutiva) con las condiciones provenientes del sistema sensorial. Los modelos más comunes emplean técnicas de elementos finitos.

Los resultados se contrastan con un patrón de estructura sana. Es el equivalente a realizar un diagnóstico de la estructura.

➤ *Predicción*

El monitoreo de salud estructural tiene el propósito preventivo de establecer si la estructura habrá de dañarse, para tomar las medidas correctivas oportunas. De ahí que la información histórica que registre, debe servir también para establecer parámetros de conformidad y tendencias, que faciliten un sistema de alerta.

➤ *Acción*

Si el monitoreo funciona bien, adquiere sentido la expresión: *hacer el mantenimiento cuando se le necesita*. De esta manera, el sistema de salud estructural puede ser concebido como el sistema nervioso de la estructura,

a través del cual, ésta siente y transmite información a un cerebro capaz de analizarla, conservarla y reaccionar apropiadamente.

Sobre los sensores

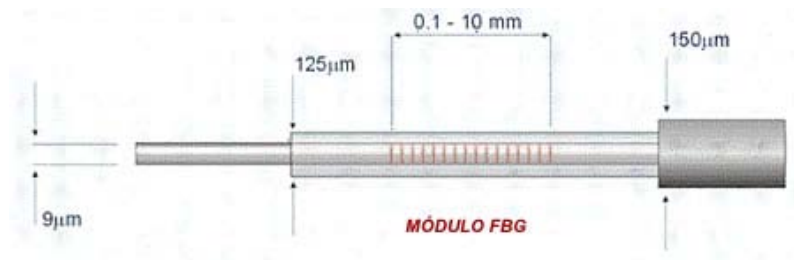
◆ General

Un sensor es un dispositivo que detecta un estímulo y transmite la información. El diseño del sensor le permite captar la información del estímulo, y transformarla en forma de señales que pueda transmitir y ser entendida. La información que capta puede ser de distinto tipo, como: distancia, aceleración, desplazamiento, inclinación, presión, fuerza, temperatura, presencia, sonido, luz. Aunque existen sensores biológicos, los más comunes y de interés para ingeniería civil, son los dispositivos mecánicos, los cuales transforman el dato del estímulo en una magnitud eléctrica (resistencia, capacidad, tensión o corriente eléctrica).

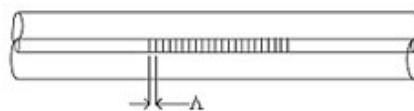
Existen diferentes tipos de sensores. Sensores de posición (basados en la emisión de una señal luminosa). Sensores por contacto (se activan o desactivan al entrar en contacto con un objeto). Sensores de circuitos oscilantes (detectan un objeto al interrumpirse la oscilación). Sensores por ultrasonido (la señal va a un receptor, y puede ser interrumpida por la presencia de un objeto). Sensores de esfuerzos (al aplicarse una fuerza varía la resistencia eléctrica). Sensores de movimientos (sea de deslizamiento, de velocidad o de aceleración).

◆ Sensores FBG (Fiber Bragg Grating)

La fibra óptica es un hilo fino de material transparente a través del cual se envían pulsos de luz. Se utilizan en telecomunicaciones para el envío de datos a gran velocidad. También se les emplea en sensores de presión y temperatura. Tienen una gran tolerancia a las variaciones de temperatura, son inmunes a las interferencias electroestáticas, electromagnéticas y de frecuencia de radio. Muy eficientes para transmitir señales a grandes distancias. Fáciles para manejar en red.



En el núcleo de un sensor FBG se ubica una fibra óptica que responde muy bien a los cambios en temperatura y deformación. Un pequeño tramo contiene interferencias al haz de luz en un periodo Λ .



INDICACIÓN DEL PERIODO VARIABLE DE REFRACCIÓN

La máxima reflectividad (tasa de energía de la onda según es reflejada en la zona de interferencias) es medida por la onda de Bragg, expresada en la siguiente relación lineal.

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

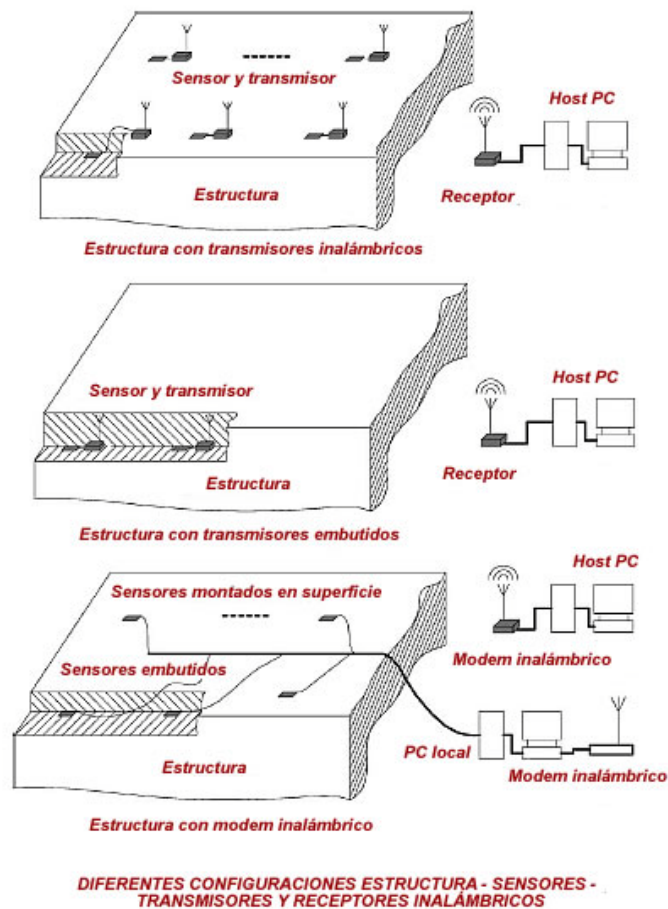
Donde n_{eff} es el índice de reflexión efectiva que depende del modo de propagación en la fibra. Tanto este índice como el periodo, varían por efecto de la deformación unitaria, ε , y la temperatura, T . El cambio obedece a la siguiente expresión:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - \rho_a)\Delta\varepsilon + \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T$$

Donde ρ_a , α , ξ ; son respectivamente los coeficientes foto-elásticos, de expansión térmica y opto-térmica. Estos coeficientes son asumidos constantes, de tal manera que la variación sólo depende de la deformación y la temperatura. Es posible separar ambos efectos.

◆ Transmisión inalámbrica

Dai-Hua Wang and Wei-Hsin Liao (The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong). *Wireless Transmission for Health Monitoring of Large Structures*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol 55, N° 3, June 2006.

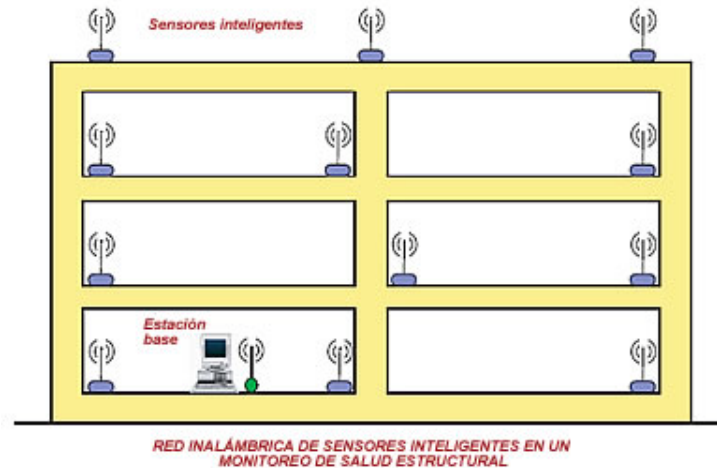


Una de las ventajas de los sensores de fibra óptica es que pueden gestionarse en grupos de números importantes. Organizados en redes inalámbricas con propósitos de monitoreo de salud estructural, obedecen a las siguientes posibles configuraciones: (1) sistemas con transmisores inalámbricos montados en la superficie, y sensores sea en superficie o embebidos, (2) sistema tanto con sensores como con transmisores embebidos, y (3) sistema con módems inalámbricos y sensores montados en la superficie o embebidos, Las dos primeras configuraciones son consideradas como de mejor futuro para el monitoreo de grandes estructuras. La integración de los sensores en la estructura puede hacerse

durante la construcción. La última configuración puede ser apropiada para edificaciones existentes.

◆ Sensores inteligentes

Yong Gao. *Structural Health Monitoring Strategies for Smart Sensors Networks*. Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering. University of Illinois at Urbana - Champaign. USA, 2005



Los sensores inteligentes tienen estas características importantes: (1) poseen su propio microprocesador, (2) tienen comunicación inalámbrica, (3) son ligeras y de tamaño pequeño, (3) pueden tener su propia unidad de almacenamiento, (4) pueden tener su propio sistema de baterías, con funcionamiento en modo de espera, y (5) ser de bajo costo. Adicionalmente pueden tener un amplio radio de comunicación, transmisión digital, algoritmos incorporados propio, sistema de diagnóstico. Todo ello con el propósito que quepa en un milímetro cúbico de tamaño.



La tendencia es hacia un nodo integrado.

Paralelamente el monitoreo de salud estructural con el uso de sensores inteligentes, incorpora su propio sistema software/hardware para su funcionamiento integral.

Aplicación del sistema de salud estructural

Referencia

Hugo F. Lima, Romeu da Silva Vicente, Régério N. Nogueira, Ilda Abe, Paulo Sérgio de Brito André, Catarina Fernandes, Hugo Rodriguez, Humberto Varum, Hypolito José Kalinowski, Aníbal Costa and Joao de Lemos Pinto (University of Aveiro, Institute of Telecommunications, Aveiro, Portugal). *Structural Health Monitoring of the Church of Santa Casa da Misericórdia of Aveiro Using FBG Sensors*. IEEE Sensors Journal, Vol 8, N° 7. July 2008.

Se presenta el sistema de monitoreo estructural aplicado a una edificación histórica, con el objetivo de conocer mejor el comportamiento de la estructura y ayudar a las intervenciones de recuperación.

Introducción

El monitoreo de salud estructural resulta particularmente importante en una edificación compleja, más si se consideran las cargas, envejecimiento de los materiales y los factores ambientales que ha tenido que soportar la estructura. Una red de sensores mide una serie de parámetros sobre la estructura y su ambiente.

Se considera en el artículo que los sensores mecánicos o eléctricos, aunque son capaces de medir tales parámetros, son de aplicación tediosa y demandan de intervención especializada. Debido a ello, el monitoreo requiere de una herramienta de mayor precisión y alcance.

La iglesia que es objeto de la investigación es la Santa Casa de Misericordia de Aveiro, construida entre los siglos XVI y XVII, de gran importancia histórica para la ciudad. Debido a su antigüedad, a haber sido sometida a varias intervenciones y técnicas de construcción así como detectarse varios materiales, en la construcción predomina la albañilería de piedra. Presenta dos áreas rectangulares: una correspondiente a la nave central, y la otra a una capilla larga. Entre ambas, dos líneas de piedras forman un arco sostenido por pilares ornamentales.

El origen de este estudio corresponde a la detección de grietas en la estructura, particularmente en la zona del arco, lo cual condujo a la necesidad de evaluar su estabilidad y monitorear parámetros de control como las deformaciones y la temperatura.

El objetivo del estudio es identificar los principales daños estructurales en la edificación, y desarrollar un sistema de monitoreo estructural que permita obtener registros continuos con la menor intrusión posible y la mínima alteración visual.

Análisis y detección de daños

Como resultado de la inspección ocular, se identificó como zona crítica de la estructura, la correspondiente al centro del arco y encima de éste. En este espacio se identificaron: aberturas en el arco en una distribución simétrica respecto al mismo, movimientos horizontales y verticales de las piedras, así como rotaciones. Algunas zonas en el arco presentaban alineamientos irregulares.

Como resultado de la inspección, y según aparece en el esquema adjunto, se delineó la zona más dañada, y se categorizó el daño en los siguientes tres grupos: aperturas, deslizamientos y rotaciones.

Para una mejor comprensión del comportamiento estructural de la iglesia, se efectuó un análisis numérico tridimensional con un software para elementos finitos. Se usaron elementos triangulares en la zona del arco y alrededor del mismo, y en forma más simple en el resto de elementos de la iglesia.

La geometría utilizada para el análisis está basada en mediciones topográficas, fotografías e inspecciones. Los espesores de los muros fueron considerados constantes con un valor de 0.85 m.

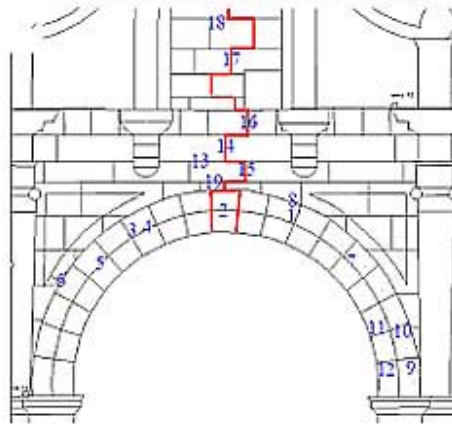
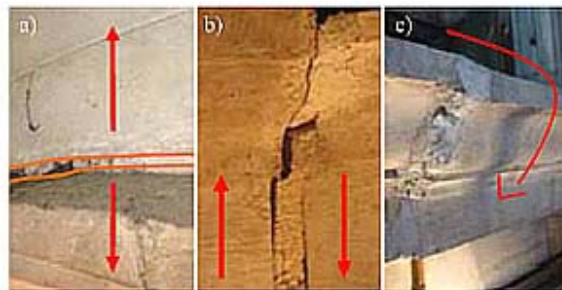


FOTO Y ESQUEMA DE LA ZONA EN ESTUDIO



DAÑOS POR ABERTURA, DESLIZAMIENTO Y ROTACIÓN

Debido a la falta de documentos sobre la cimentación, ésta fue supuesta como elementos rígidos en la base. Considerando la edad de la estructura, la degradación de los materiales, la diversidad de los mismos, y las distintas técnicas de construcción, se consideró un modelo simple de análisis basado en un solo material, con comportamiento elástico, lineal e isotrópico. Las características consideradas son las siguientes.

- Material: albañilería de piedra.
- Módulo de elasticidad, E : 2000 MPa.
- Coeficiente de Poisson, ν : 22.0 kN/m³.
- Resistencia a la tracción: 0.05 MPa.
- Resistencia a la compresión: 1.00 MPa.

Sistema de monitoreo de salud estructural

◆ Sensores FBG

El trabajo seleccionó a los sensores FBG por estar basados en fibra óptica, ser pequeños, de escaso peso, capaces de mantener la resistencia y flexibilidad de la fibra. De bajo costo. Versátiles para medir diferentes parámetros. Insensibles a campos electromagnéticos (líneas de fuerza, trenes, tormentas). Pueden conducir directamente, y en forma inalámbrica si fuese necesario, alta densidad de información.

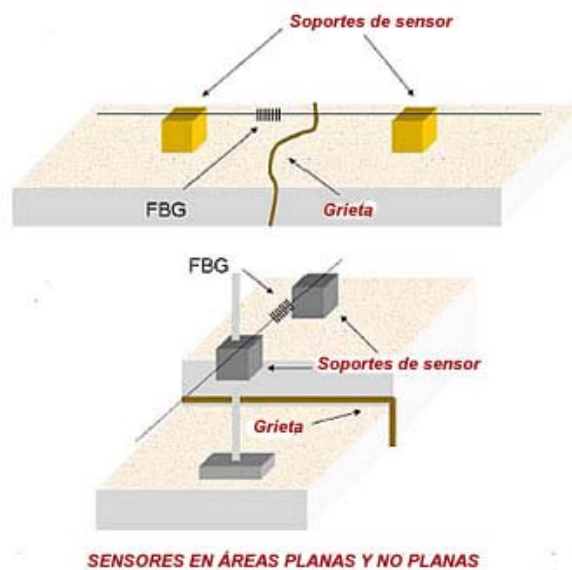
Como se mencionó, asumiendo constantes los coeficientes, con estos sensores se puede medir deformaciones y temperatura, incluso en forma separada.

◆ Ubicación de los sensores

Los 19 sensores de desplazamiento fueron localizados según se enumeran en el esquema anterior, y en concordancia con los puntos de mayor daño o expectativa del mismo. Seis de estos sensores fueron localizados encima del arco.

Se instalaron cinco sensores de temperatura. Uno debajo del arco. Otro en su base. Otro en la parte superior del arco. Otro encima del arco. Y uno último a la salida de la iglesia.

◆ Descripción del sensor



Se emplearon dos sistemas de montaje dependiendo de los desniveles de sensores contiguos. Uno para regiones planas como en dos renglones de piedra en el arco. Otro para regiones no planas como en el caso de aperturas.

Buscando un mínimo daño a la piedra, se evitó la perforación a la misma, y de ahí que los sensores fueron pegados a la piedra usando una resina epóxica.

Respetando el mínimo impacto visual, se emplearon soportes de tamaño muy pequeño. Estos soportes fueron calibrados para compensar los efectos de expansión térmica y posible flexión de los mismos.



SENSORES DESPUÉS DE LA INSTALACIÓN

La longitud del FBG fue de cerca de 2 mm, y el total de longitud de los sensores varió entre 140 a 300 mm, con un rango de desplazamiento de trabajo de $\pm 0.2\%$, permitiendo tanto apertura como cierre.

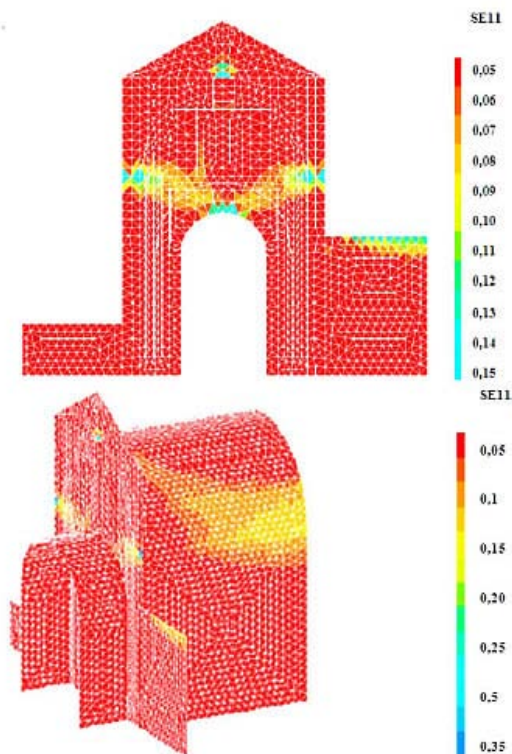
El artículo describe las características reflectivas del FBG y la sensibilidad cruzada temperatura - deformación.

La red de sensores está conformada por cuatro cables con cinco sensores cada uno, y un cable con cuatro sensores, conectados a una sola unidad y con un único modo de fibra óptica.

◆ **De la instalación**

Se utilizaron dos semanas de abril del 2006. Definida la localización de los sensores, las partes correspondientes fueron limpiadas para asegurar la adherencia. Después de instalados los sensores, fueron conectados en cables y estos a su vez hacia la unidad local de control.

Análisis numérico

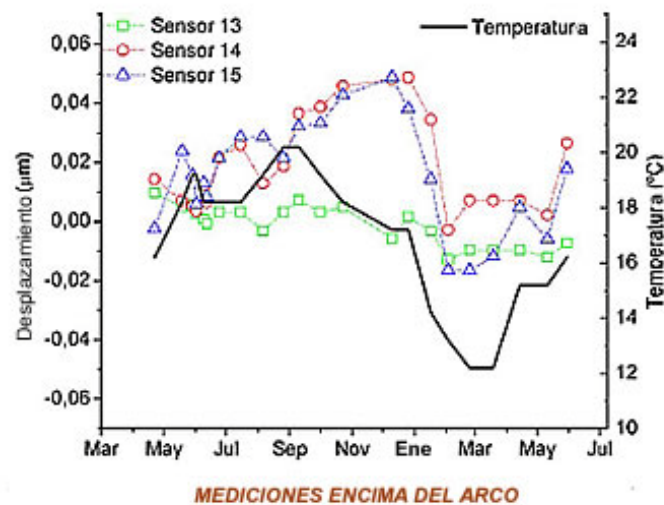


MÁXIMAS TENSIONES Y DEFORMACIONES SEGÚN ELEMENTOS FINITOS

Considerando sólo el peso propio, el análisis de elementos finitos indicó tensiones por encima de los límites de resistencia, especialmente en el

centro y vecindades del arco, confirmando las zonas críticas del análisis y del sistema de salud estructural.

Monitoreo estructural



Se obtienen resultados de temperaturas y desplazamientos, presentándose las variaciones respectivas a lo largo de un año. En relación con las diferentes longitudes de los sensores, la resolución de los desplazamientos puede variar de 1.1 a 2.3 μm . Las mediciones se efectuaron cada 60 s registrándose un promedio de los valores pico.

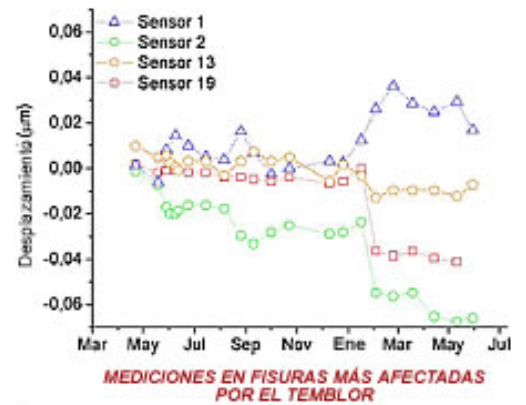
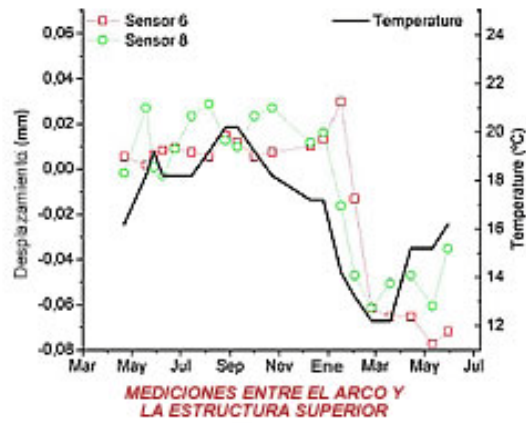
En el artículo se asume que estos desplazamientos pueden ser de diferente tipo.

- Desplazamientos termo-mecánicos debido a expansiones/retracciones de los materiales por cambios en la temperatura.
- Desplazamientos estructurales, caracterizados por el movimiento efectivo entre las piedras. Estos pueden ser causados por vibraciones de tráfico o temblores, y aún por acumulación de esfuerzos térmicos.

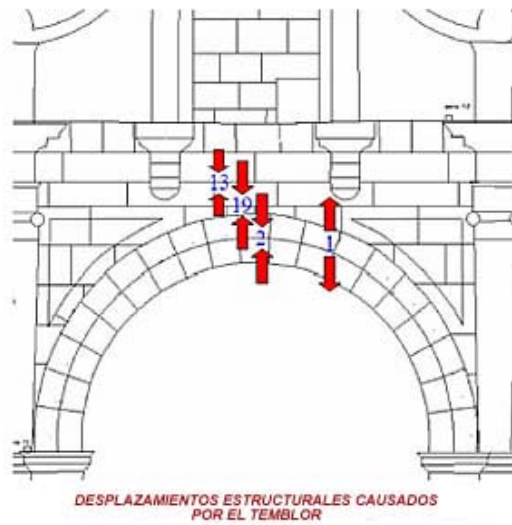
La figura representa los resultados para algunos de los sensores localizados encima del centro del arco. Los sensores 14 y 15 miden los movimientos horizontales entre las piedras (en el gráfico se distinguen variaciones importantes durante setiembre a febrero, pero si se observa en el total del año, el desplazamiento relativo es poco significativo). El 13 mide el desplazamiento vertical (que muestra mayor estabilidad que los otros).

También el estudio proporciona información para el resto de sensores. En el caso de los sensores 6 y 8 localizados entre el arco y las piedras de arriba del mismo, es posible observar la mayor magnitud de los desplazamientos. El resultado es consistente con el análisis numérico el cual mostró que se trata de una zona sometida a severas tensiones.

El 12 de febrero del 2007, ocurrió un temblor de 5.9 de magnitud, con el epicentro localizado a 500 km de Aveiro, y sentido por la población. Y por lo tanto por la estructura en estudio. La figura muestra los registros y la incidencia del evento. Los sensores estaban localizados en el centro del arco y en la zona encima del mismo, justamente la región más afectada por el temblor. Los sensores 2, 3 y 19 ubicados en el centro del arco revelaron un decrecimiento en las dimensiones de la separación, mientras que el sensor 1 localizado en a un costado mostró un incremento del mismo. Los sensores 14 y 15 emplazados en la misma región, pero midiendo desplazamientos horizontales, mostraron escasa perturbación al efecto del sismo.



Estos movimientos se ilustran en el diagrama adjunto.



Conclusiones

El sistema instalado cumplió los propósitos de ocasionar mínimos daños a la estructura, escasa perturbación visual, y posibilidad de obtener registros continuos, aún bajo una sollicitación sísmica.

Con posterioridad al monitoreo reportado en el estudio, y a la fecha del artículo, aún se leen registros cada dos semanas, prestándose el sistema como una base para obtener mayor información de interés.