

MANTENIMIENTO Y EXPLOTACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS CON FIBRA ÓPTICA

Maintenance and exploitation of infrastructures with optical fiber

Sergi Villalba Herrero^(a), Vicente Alegre Heitzmann^(b)

^(a) Doctor Ingeniero Industrial. Director del Departamento de Ingeniería de COTCA SA..

^(b) Ingeniero de Caminos. Director Técnico de COTCA SA..

RESUMEN

La gestión de una infraestructura optimizando costes cuenta desde hace algunos años con una herramienta potencialmente útil por su versatilidad y nivel de información suministrada como es el uso de la fibra óptica. Su versatilidad y la fácil instalación en comparación con los sistemas de monitorización tradicional es una característica importante de su potencial. Los resultados obtenidos de la monitorización llevada a cabo y presentada en este artículo, muestra el éxito de los sensores. La exactitud de los resultados obtenidos valida el uso de esta técnica de monitorización para la detección de la aparición prematura de fisuras, así como su evolución y comportamiento prematuro.

ABSTRACT

The management of an infrastructure with costs optimized has, from some years ago, a potentially useful tool, for its versatility and level of information administered, as is the use of fiber optics. Its versatility and easy installation compared to traditional monitoring systems is an important feature of its potential. The results obtained from the monitoring infrastructure carried out and presented in this article show the success of the sensors. The accuracy of the results obtained validates the use of this monitoring technique for detection of the premature appearance of fissures, as well as its evolution and premature behaviour.

PALABRAS CLAVE: fibra óptica, instrumentación, estructuras, microdeformaciones.

KEYWORDS: optical fiber, instrumentation, structures, microdeformations.

1. Introducción

Con objeto de que las infraestructuras no sean dañadas cuando se realiza una intervención próxima al área de influencia de los túneles del metro, la administración, en este caso TMB, *Transportes Metropolitanos de Barcelona*, obliga a una justificación técnica de la no afectación y a una instrumentación en la infraestructura (el túnel) mientras se realizan las intervenciones previstas.

Dentro de este marco, durante la ejecución de un edificio por encima de la

bóveda del metro de la línea 9 de Barcelona se ha medido con fibra óptica la evolución de las microdeformaciones en una sección transversal que han servido para validar la actuación, confirmar que no ha sido afectada la infraestructura y poder ser utilizada en el futuro como instrumentación de seguridad en el túnel, complementando otras actuaciones de mantenimiento.

Una vez terminada la obra, el sistema de medición adherido al hormigón de la sección

transversal del túnel, la fibra óptica, puede ser utilizado para medidas a lo largo del tiempo, por ejemplo si se hacen obras de modificación del edificio o cambia el uso de la infraestructura superior, o se produce alguna disfunción o acción accidental en el túnel que requiera información sobre la seguridad del comportamiento estructural.

Los movimientos medidos como respuesta al vaciado de tierras y construcción de cimientos, estructura y acabados, permiten ajustar el modelo de comportamiento previsto inicialmente y calibrar los datos planteados.

Por ejemplo, ayudan a calibrar y ajustar los datos introducidos para modelar el terreno, que sirvieron de base para hacer estimar las tensiones y deformaciones en esa sección del túnel y de diseño del plan de contingencias.

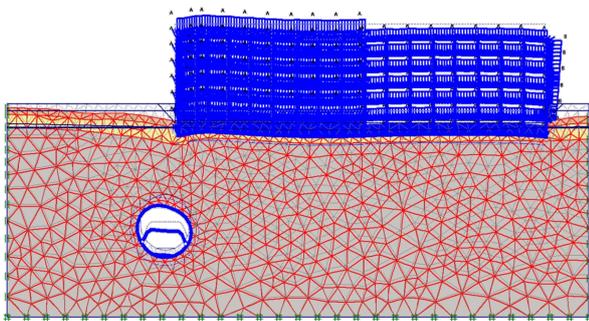


Figura 1. Modelo bidimensional de interacción túnel-suelo-edificación (Plaxis).

2. Instrumentación en la sección de Metro. Línea 9

La Línea 9 Norte de Barcelona consta de 8 estaciones con una longitud de línea de 7.8 km con una duración media de trayecto de 15 minutos. Actualmente, la zona del barrio del

Bon Pastor se encuentra en un proceso continuo de remodelación mediante la construcción de diferentes bloques de edificios.

Uno de éstos, se ubica dentro del ámbito de afectación e influencia del Metro, hecho que conlleva la necesidad de monitorizar estratégicamente el mismo.

El tramo instrumentado corresponde a la vía 2 entre las paradas de Bon Pastor y Once de Septiembre. El túnel instrumentado de la L9 es una sección típica de sección circular formada por dovelas prefabricadas con vías superpuestas y losa intermedia tal y como se muestra en la Figura 2 y 3.

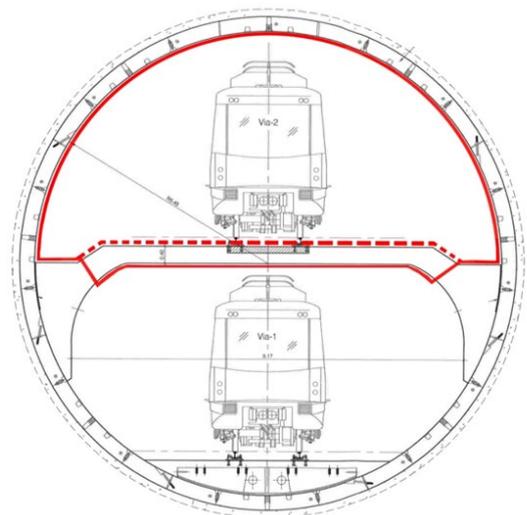


Figura 2. Sección completa del túnel de la L9.



Figura 3. Tramo superior de sección monitorizada.

Se presenta el empleo de la fibra OBR, *Optical Backscatter Reflectometer*, en la estructura civil existente correspondiente a a una sección de túnel de Metro de L9, infraestructura construida en Barcelona.

La fibra utilizada se basa en un tipo de fibra óptica con una longitud máxima de 50 m. configurada por una fibra de tipo monomodo de sílice (vidrio) con un diámetro de núcleo de 2 mm y una fina capa de polímero (poliamida) de protección contra arañazos y ataques ambientales [2]. En primer lugar, las superficies de contacto y unión fueron limpiadas y libres de grasa, seguido de la aplicación de un adhesivo comercial del tipo bicomponente epoxídico para la materialización del pegado de la fibra a la superficie de hormigón, evitando aplicar exceso de adhesivo. La razón principal del uso de fibras prácticamente “desnudas” es la transferir de manera óptima la posible variación de las microdeformaciones del material al núcleo de la fibra.



Figura 4. Carrete empleado de fibra de 50 metros

La decisión de implementar DOFS, *Distributed Optical Fiber Sensors*, en este caso se toman teniendo en cuenta las condiciones de trabajo y los sensores se colocan estratégicamente en la sección de máxima influencia y afectación por la construcción del nuevo edificio (Figuras 5 - 7).

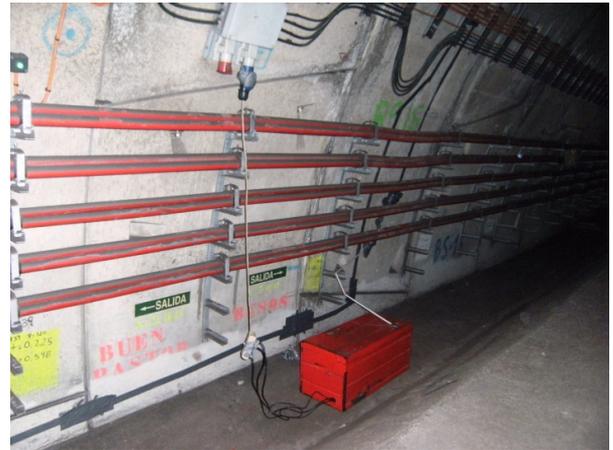


Figura 5. Ubicación de la estación de trabajo.

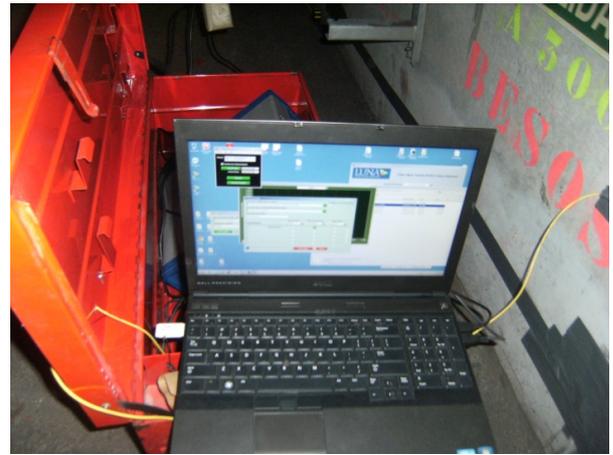
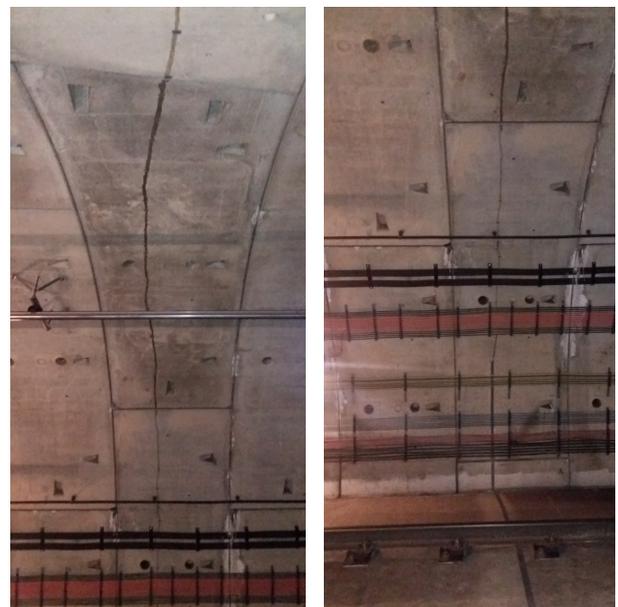


Figura 6. Calibración y puesta a punto del software.



Previo al registro de lecturas se ha realiza una toma de datos de definición del estado actual y se genera un catálogo de las disfunciones actuales en aras de focalizar

posibles disfunciones no causadas por la ejecución del edificio.

La monitorización se prevé llevar a cabo a lo largo de un intervalo no inferior a 18 meses, duración que engloba la ejecución de toda la estructura, cerramientos y envolventes del edificio. Las lecturas se realizan de forma continua, intensificándose en aquellos intervalos de tiempo donde se ejecutan las actuaciones consideradas críticas e hitos de construcción: estado inicial, pre-excavación, excavación, hormigonado de cimentación, ejecución estructura bajo rasante, ejecución estructura sobre rasante y ejecución de envolventes.

2.2 Resultados

Se analizan los resultados obtenidos en los 50 m. de fibra óptica, los últimos 40 m. de los cuales se encuentran adheridos a la estructura, dejando los primeros 10 metros sin adherir, ajustándose a la sección del túnel de manera que se interrogaron 4000 puntos simultáneamente con una resolución espacial de 1 cm. La información obtenida mediante el ODiSI, *Optical Distributed Sensor Interrogator*, corresponde a lecturas continuas obtenidas en diferentes intervalos de tiempo.

A partir de ésta, se realiza una revisión de la misma y, de forma continua, se incorporan las nuevas lecturas, de forma que se obtiene un gráfico tridimensional a origen donde interactúan las horas (desde un estado inicial-cero de calibración), la distribución de la fibra (longitud de la fibra), y las variaciones microderfomacionales a lo largo de la misma.

Para una mejor comprensión de las diferentes etapas y tareas realizadas, se incorpora en la figura 8 de fases con las juntas de dilatación de obra, que nos sirven como base de referencia de las tareas realizadas.

En la Tabla 1 se detallan los diferentes procesos de obra junto a los intervalos de tiempo de las lecturas.

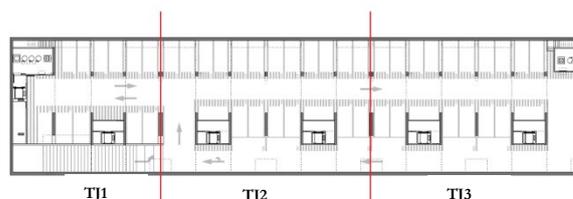


Figura 8. Planta del edificio con juntas de dilatación.

Tabla 1. Cronograma de actuaciones.

Periodo	Actuación
4 Octubre	Estado inicial
7 Octubre	Pre-excavación
18 Oct. – 07 Nov.	Excavación
13 Dic.	Inicio Hormigonado cimentación
7 -28 Enero	TJ1→Muros, pilares PS-1 y enc. TPS-1. TJ2→Losa cim. +pilares de PS-1. TJ3→Sin ejecución.
28 En.-14 Feb.	TJ1→Armado y hormigonado TPS-1. TJ2→Encofrado de forjado TPS-1. TJ3→Armado de losa cimentación.
14 Feb. -18 Marzo	TJ1→Pilares. PB. Encofrado TPB. TJ2→Armado y hormigonado TPS-1. pilares de PB. TJ3→Losa cim. + Muros, pilares PS-1
18Marz.- 5 Abril	TJ1→Hormigonado TPB y encofrado TP1. TJ2→Encofrado de forjado TPB. TJ3→Encofrado de forjado TPS-1.
5 – 18 Abril	TJ1→Hormigonado TP1. TJ2→Encofrado TPB (cont.). TJ3→Armado y hormigonado TPS-1.
18 -22 Abril	Semana Santa
23 Abril -10 Mayo	TJ1→Hormigonado TP1 (cont.). TJ2→Armado TPB. TJ3→TPS-1 (cont.).
10 - 25 Mayo	TJ1→Encofrado TP2. TJ2→Hormigonado TPB. TJ3→Encofrado TPB.
25 Mayo – 8 Junio	TJ1→Pilares P2 y encofrado de TP2. TJ2→Hormigonado pilares P1. TJ3→Pilares PB y armado TPB.
8 -22 Junio	TJ1→Hormigonado TP2. TJ2→Pilares P1. TJ3→Pantallas de PB a P1.
22 Junio -6 Julio	TJ1→ Pilares P3. TJ2→Encofrado TP1 + Esc. PB a P1. TJ3→Hormigonado TPB.
6 - 20 Julio	TJ1→Pantallas PB + hormigonado TP3. TJ2→Hormigonado TP1 + pilares P2. TJ3→Pilares P1 + encofrado TP1.
20 Julio - 6 Agosto	TJ 1 → Pilares P4. TJ2→Hormigonado TP2+ Esc. P1 a P2. TJ3→Hormigonado TP1.

Los resultados más significativos obtenidos a partir de la monitorización planteada son presentados. En la figura 9 se muestra la evolución temporal de $\mu\epsilon$ a lo largo de la FO, *Fibra Óptica*, desde el inicio de obra (intervalo completo: 4 de octubre 2018 hasta 06 de agosto del 2019).

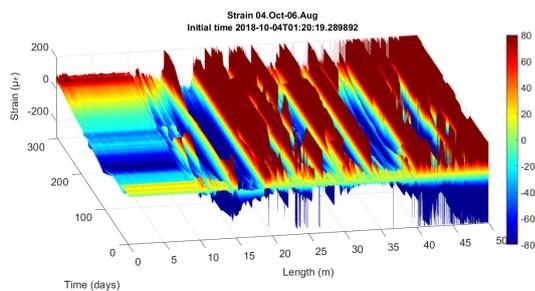


Figura 9. Evolución temporal de $\mu\epsilon$ a lo largo de la fibra óptica.

En aras de disponer un control óptimo de la sección curva de túnel, se incorpora el registro de las lecturas en 6 puntos críticos representativos de control a lo largo de la bóveda de la sección de túnel. La figura 10 muestra la identificación de los puntos críticos y la figura 11 la evolución temporal de las lecturas desde su origen.

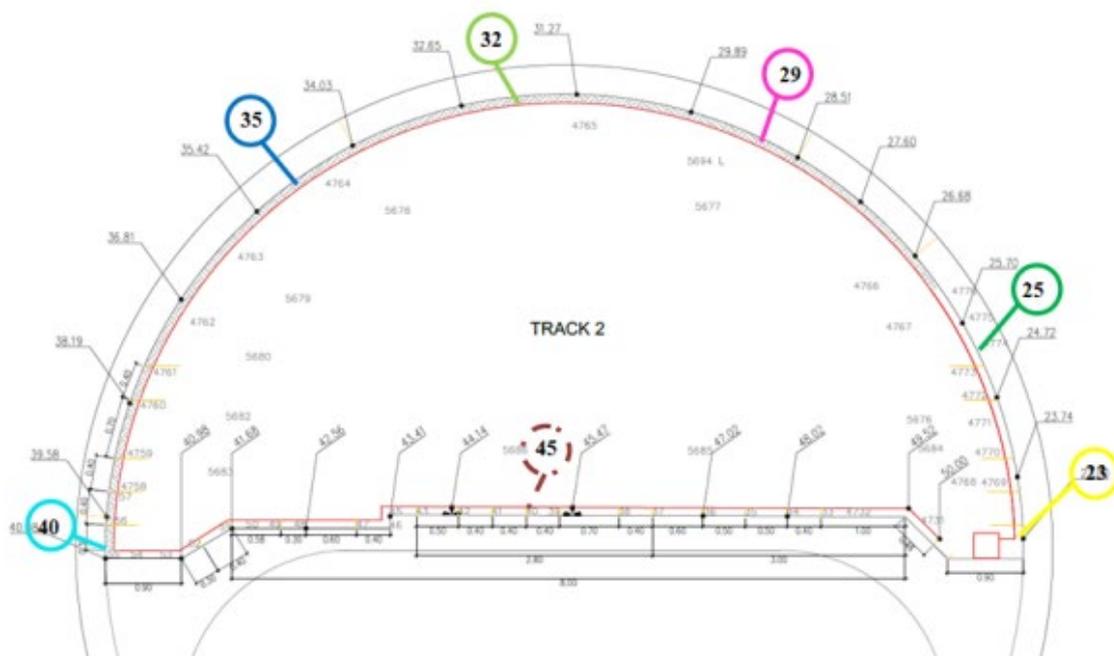


Figura 10. Identificación de puntos críticos de la sección monitorizada del túnel.

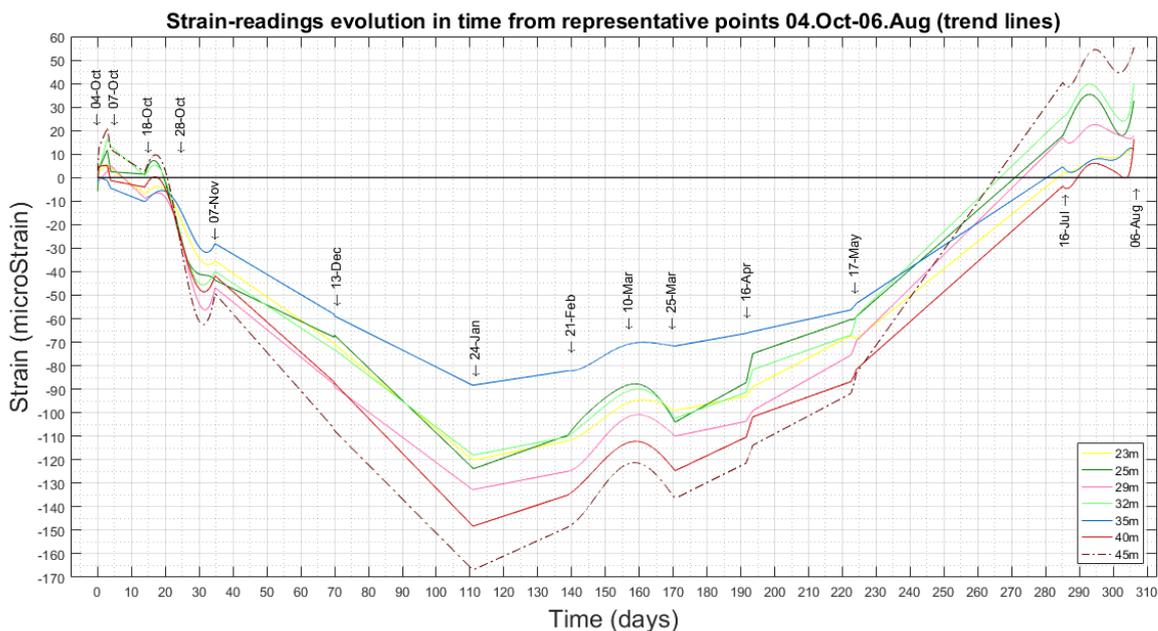


Figura 11. Evolución temporal de los puntos críticos de control.

Las lecturas obtenidas mediante la FO, *Fibra Óptica*, reflejan claramente la evolución de las obras ejecutadas.

Respecto a los 6 puntos críticos de control comprendidos en el *tramo de fibra entre los 23 y 40 m (zona de bóveda)*, se puede observar como:

A lo largo de todo el periodo de vaciado de tierras y ejecución del primer tramo de losa de cimentación "TrJ1", correspondiente al período comprendido entre el 4 de octubre hasta el 7 de enero, los puntos críticos de referencia sufren de forma general un incremento de $\mu\epsilon$ debido a la descompresión originada por las tareas de excavación y vaciado de tierras de la obra. Esta descompresión produce una cierta "ovalización" de la sección, que se traduce en un incremento de compresión en la fibra interior de la sección (la fibra interior de la sección "monitorizada" se comprime y la fibra exterior de la sección "no monitorizada" se descomprime).

Desde el 7 de enero y hasta el 18 marzo, se observa como las $\mu\epsilon$ en el puntos se invierten; es decir, sufren una disminución de compresión, dado los

incrementos de cargas para la construcción de los diferentes elementos estructurales en el sótano-1 y la planta baja, en las diferentes fases secuenciales de obra entre los tramos de las juntas TrJ1, TrJ2 y TrJ3.

A partir del 18 de marzo y hasta el 5 de abril, se observa una cierta atenuación en el decremento de las microdeformaciones; es decir, una atenuación en la disminución de las compresiones. Este efecto, se considera normal dado el acomodo y readaptación de las cargas que se transmiten por la ejecución de la losa de cimentación y forjado de techo sótano -1 (TS-1), en los tramos TrJ2 y TrJ3, los cuales se encuentran más alejados de la interferencia del trazado del túnel. Es decir, la evolución secuencial de construcción del edificio, considerado como sólido rígido, con sus diversas etapas constructivas, induce a este tipo de respuesta sobre la sección del túnel.

En el periodo del 5 de abril hasta el 17 de mayo, se observa como los puntos vuelven a la tendencia de la disminución de compresión, dado los incrementos de cargas para la construcción de los diferentes elementos estructurales en el techo de

planta + 1 y la planta baja, en las diferentes fases secuenciales de obra entre los tramos de las juntas TrJ1, TrJ2 y TrJ3. Asimismo, este efecto de atenuación, se irá repitiendo de forma secuencial entre las diferentes fases de ejecución de los techos y dada la secuencia evolutiva de los diferentes tramos de la obra.

Los últimos datos postprocesadas disponibles (06 de agosto), constatan como todos los puntos han vuelto a su estado de origen de tensiones. Todos siguen con la tendencia clara de disminución de la compresión, dado los incrementos de cargas por la construcción de los diferentes elementos estructurales del techo de planta +3 y de la planta baja, en las diferentes fases secuenciales de obra entre los tramos de las juntas TrJ1, TrJ2 y TrJ3.

Hay que tener presente que el estado actual de la construcción de la obra, y sobre todo en la junta TrJ1, cuyo tramo de obra es el de mayor influencia con el túnel, se encuentra prácticamente ejecutada a falta de la ejecución de la cubierta. Por lo tanto se observa como el estado de tensiones, y en consecuencia de deformaciones, se encuentra prácticamente en origen con alguna variación de 20 microdeformaciones respecto a los valores de origen, lo que ratifica la correcta respuesta de la estructura del túnel. En consecuencia, en ningún caso los valores obtenidos superan el umbral de aviso establecido en el Plan de auscultación y contingencias.

Respecto al punto de control (45) correspondiente al centro del tramo de la losa intermedia, se continúa corroborando lo que se especifica en epígrafes anteriores del presente apartado de análisis. La ovalización originada por la descarga (excavación del terreno) induce que la losa intermedia aumente la compresión por su efecto de puntal y de arriostamiento que desarrolla. En el momento que se inicia el

proceso de construcción de la losa, sótanos, y techos, este efecto se invierte de forma que las compresiones originadas también disminuyen en la losa tal como corrobora las monitorización continua en este punto (45).

Respecto al resto de tramos de la fibra, el tramo de fibra comprendida entre 10 y 23 m corresponde al tramo de monitorización longitudinal. En esta zona se observan valores a compresión y tracción, pero que a lo largo de su evolución han estado en todo momento constantes, es decir, sin variación respecto al origen de las lecturas y de calibración. Este hecho indica que en este tramo no ha habido variaciones en la respuesta de la estructura, de forma que las actuaciones realizadas no han originado cambios de respuesta apreciables en la estructura.

El tramo de fibra comprendida entre 0 y 10 m corresponde al tramo de fibra sin adherir. En esta zona se observa una evolución lineal sin cambios diferenciales, donde se constata que no hay variaciones sustanciales de temperatura que inducen variaciones tensionales importantes, de forma que no influyen en el resto de las zonas de FO, *Fibra Óptica*, adherida.

Asimismo, se aprecian picos y/o discontinuidades obtenidos de la monitorización, los cuales corresponden a las zonas de junta entre tramos de las dovelas donde la fibra óptica sufre una desadherencia con el hormigón, ya desde su implantación en origen. Estos picos permanecen estables en cuanto a su ubicación.

En relación al campo de análisis de tensiones, y a partir de la definición del módulo de deformación longitudinal secante E_c de hormigón y para un estado de tensiones en condiciones de servicio; es decir, por un estado o estadio elástico donde las tensiones de las fibras del hormigón de la sección son proporcionales a las deformaciones [3] [4], se desprende que a pesar de observar este

incremento de $\mu\epsilon$, éstas no inducen unas tensiones excesivas en la misma.

3. Generación de un modelo estadístico.

En las figuras 12 y 13 se indican las acciones y respuestas de cada situación de cargas provocada por la construcción del edificio que sirve de base para crear el modelo estadístico que permitirá mejorar el plan de contingencias ante cualquier acción accidental o de otro tipo (por ejemplo sismo), ya que se conoce con más precisión los valores de rigidez de la sección transversal y la respuesta del terreno.

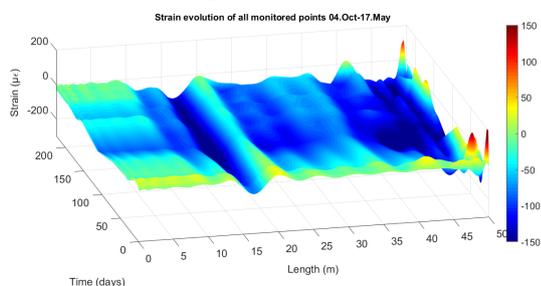


Figura 12. Respuesta temporal de $\mu\epsilon$ a lo largo de la fibra óptica.

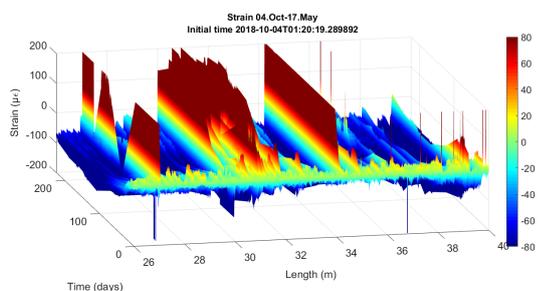


Figura 13. Respuesta temporal de $\mu\epsilon$ a lo largo de la fibra óptica.

4. Incorporación al plan de mantenimiento y explotación.

Desde el año 2003 TMB dispone de una herramienta para la gestión de los túneles de la red cuya sección transversal se definió con un túnel scanner, como se observa en la figura 14,

en los entonces 92kms de red, las variaciones de la sección transversal en zonas conflictiva se podrían obtener pasando de nuevo el túnel-scanner y viendo las posibles ovalizaciones de la sección transversal y valorar sus consecuencias.

La línea 9 de nueva construcción no ha sido comprobada con este método hasta la fecha, pero si dispone en una sección de un sistema de instrumentación del cual se puede extraer información sobre posibles ovalizaciones con mucha mayor precisión a partir de las microdeformaciones medidas.

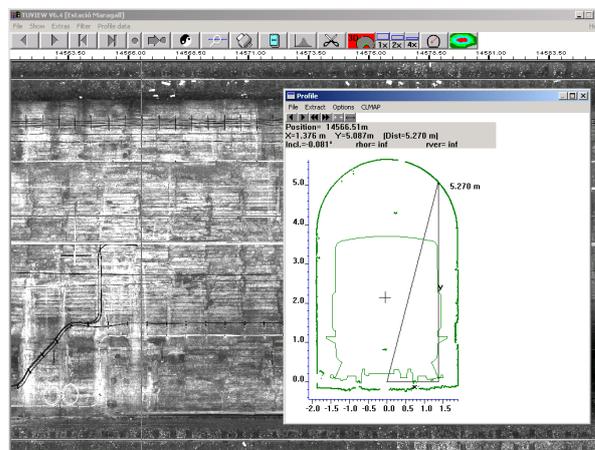


Figura 14. Túnel-scanner existente de la red de TMB de 2003.

5. Conclusiones

En este trabajo, se ha presentado la aplicación exitosa de sensores de fibra óptica distribuidos, DOFS, *Distributed Optical Fiber Sensors*, para el monitorización de la salud estructural de una infraestructura real. Debido a su particularidad, la estructura ha sufrido cambios en su comportamiento estructural sin dejar de cumplir su funcionalidad.

Mediante la aplicación de esta tecnología ha sido y es posible seguir y monitorear su comportamiento estructural durante los diferentes procedimientos de construcción en durante más de 10 meses de forma continua.

Con las lecturas de DOFS en diferentes fechas, ha sido y es posible detectar fácilmente

los incrementos de tensión en la estructura y de esta manera evaluar su seguridad estructural, y en caso contrario tomar las medidas correctivas necesarias.

Además, la evolución de la variación de tensión a lo largo de una extensa longitud de estructura se logra con una instalación relativamente simple y fácil de un solo sensor y una conexión a un terminal de lectura.

Los resultados obtenidos en este trabajo, la teoría OBR, *Optical Backscatter Reflectometer*, asociada con DOFS, *Distributed Optical Fiber Sensors*, demuestra su confiabilidad en las aplicaciones de ingeniería civil de SHM, *Structural Health Monitoring*, y continúa mostrando el futuro prometedor de los sistemas de monitorización basados en esta tecnología.

Se ha presentado un sistema de instrumentación que colocado en secciones del túnel que en algún momento lo han requerido para comprobar su correcto funcionamiento, esta instrumentación con fibra óptica se utiliza posteriormente para estudiar posibles disfunciones futuras, pudiendo de esta forma optimizar técnicamente y económicamente la gestión de la red.

Agradecimientos

Los autores de la presente comunicación quieren agradecer efusivamente a TMB, *Transportes Metropolitanos de Barcelona*, por la colaboración y apoyo prestado a lo largo del desarrollo de todo el trabajo, desde la implantación, accesos y mantenimiento y supervisión de los equipos.

También agradecer la colaboración a la UPC, *Universidad Politécnica de Catalunya*, y en especial atención al catedrático Joan Ramon Casas Rius, por el asesoramiento prestado a lo largo de toda la monitorización.

Finalmente agradecer los trabajos prestados de Judit Gómez Esteve estudiante de Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, de la UPC.

Referencias

- [1] C.E.B.-F.I.P. Código Modelo CEB-FIP 2010 para hormigón estructural. 2010.
- [2] RODRÍGUEZ, G., CASAS, J.R., & VILLABA, S. “Cracking assessment in concrete structures by distributed optical fiber”. *Smart Materials and Structures*, (2015b), 24(3), 35005.
- [3] LUNA. “Distributed fiber optic sensing: Temperature Compensation of strain measurement contents”. Author. 2014.
- [4] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.