

Avances en la instrumentación de estructuras con fibra óptica. El presente de una instrumentación con futuro

V. Alegre^{1*}, S. Villalba² 

*Autor de Contacto: info@cotca.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.485>

Recepción: 14/11/2019 | Aceptación: 30/10/2020 | Publicación: 01/01/2021

RESUMEN

Se discute el ejemplo de un caso real en el que, sobre un túnel existente que se instrumenta con fibra óptica, se construye un edificio. Ello permite hacer el seguimiento de la historia de cargas de una estructura desde que se coloca la fibra óptica. Para constatar que no se ve afectado estructuralmente el túnel durante el período de construcción, se instrumentan secciones del mismo y se miden las microdeformaciones que se producen, que se comparan con las del modelo. Se han podido apreciar las ovalizaciones y tensiones en la bóveda durante las distintas fases del proceso constructivo, estando todas ellas por debajo de los valores límites establecidos en el plan de contingencias. Esta técnica ha permitido validar durante todo el proceso las obras realizadas.

Palabras clave: fibra óptica; instrumentación; túneles; microdeformaciones.

Citar como: Alegre, V., Villalba, S. (2021), "Avances en la instrumentación de estructuras con fibra óptica. El presente de una instrumentación con futuro", Revista ALCONPAT, 11 (1), pp. 105 – 122, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.447>

¹ COTCA, S.A., Profesor Asociado Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, UPC, Barcelona, España.

² COTCA, S.A., Profesor Asociado Departamento de Ingeniería de Proyectos y de la Construcción, UPC, Barcelona, España.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor V. Alegre contribuyó en la gestión de convencer a la administración de las ventajas de este tipo de aplicaciones, y en el proceso de implementación en obra de la fibra óptica, definición de la zona idónea en función de las posiciones del edificio y del túnel, y puesta en marcha.

El autor S. Villalba desarrolló el modelo utilizado para la interpretación de resultados, realizó el plan de lecturas previsto en función de las fases de obra y analizó e interpretó los resultados obtenidos y las conclusiones de los mismos a lo largo de todo el proceso de obra.

Licencia Creative Commons

Este trabajo está publicado bajo los términos de una Licencia Internacional Creative Commons Atribución 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2021 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2021.

Advances in the implementation of optical fiber on structures. The present of an implementation with a future

ABSTRACT

An example of a real case is discussed in which, on an existing tunnel, which is instrumented with optical fiber, a building is built. This makes possible to track the load history of a structure since the fiber is placed. To verify that the tunnel is not structurally affected during the construction period, sections of it are instrumented and the micro deformations that occur are measured, which are compared with those of the model. It has been possible to appreciate the ovalizations and tensions in the vault during the different phases of the construction process, all of them being below the limit values established in the contingency plan. This technique has made possible to validate the works carried out throughout the process.

Keywords: optical fiber, instrumentation, tunnels, microdeformations

Avanços na instrumentação de estruturas com fibra ótica. O presente de uma instrumentação com futuro

RESUMO

É discutido o exemplo de um caso real em que, em um túnel existente, um edifício é construído com instrumentação de fibra ótica que permite monitorar o histórico de carregamento de uma estrutura desde sua instalação. Para verificar se o túnel não é estruturalmente afetado durante o período de construção, trechos do túnel são instrumentados e as microdeformações ocorridas são medidas, as quais são comparadas com as do modelo. Foi possível apreciar as ovalizações e tensões na abóbada durante as diferentes fases do processo de construção, estando todas abaixo dos valores limites estabelecidos no plano de contingência. Esta técnica permitiu validar os trabalhos realizados ao longo do processo.

Palabras clave: fibra ótica; instrumentación; túneles; microdeformaciones.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Un problema técnico frecuente es la interacción entre las obras de nueva construcción y las infraestructuras existentes. Las distintas partes de una infraestructura se gestionan para una vida útil determinada, como es el caso de la Red de Metro de Barcelona, cuyo estado actual se definió de forma ordenada entre 2000 y 2003 dejando, entre otros documentos, un túnel virtual de los 92 km de entonces, con la geometría de la sección transversal y el catálogo de daños y disfunciones para su gestión. Los primeros kilómetros de túnel son de 1924 y, lógicamente, la administración responsable (Generalitat de Catalunya) y el ente que lo gestiona (Transports de Barcelona, S.A.) obligan a que en los nuevos edificios construidos dentro del área de influencia de su infraestructura se compruebe que no afectan al uso y servicio de la red, ni a su estructura. Para ello, entre otras cosas, exige que se evalúe estructuralmente la zona afectada facilitando la información estructural de que dispone, y que se registren los movimientos que se producen en la infraestructura durante la construcción de la nueva obra, actuando en consecuencia.

Para realizar este seguimiento, se realizan en ocasiones mediciones con teodolitos monitorizados de varios puntos de la sección transversal. Si se desea más precisión para evaluar los riesgos, una herramienta muy válida es la tecnología de la fibra óptica que, adherida a la superficie, permite medir microdeformaciones en, por ejemplo, las secciones transversales centímetro a centímetro.

Esta tecnología consiste en el uso de un reflectómetro óptico de retrodispersión denominado sistema OBR (Optical Backscatter Reflectometer) como una herramienta de monitorización, en este caso, de una estructura de hormigón armado de un túnel con dovelas de la Línea 9 en Barcelona, que podría presentar fisuras o disfunciones en estado de servicio, como consecuencia de la construcción de un edificio que se realiza parcialmente sobre dicho tramo de túnel.

La principal característica del sistema OBR es su gran sensibilidad y alta resolución espacial a través del uso de fibra óptica como sensor. Lo anterior, produce registros de deformaciones en los cuales se puede identificar y localizar la presencia de fisuras.

Sobre ese túnel se va a realizar un edificio, habiéndose modelado todo el proceso: vaciado, losa de cimentación, ejecución de la estructura y puesta en carga de todos los subsistemas que forman parte del edificio (fachadas, pavimentos, tabiquería, instalaciones, ...).

Para estas etapas de carga, se establecen los valores esperados, y se crea un plan de contingencias con avisos, alertas y alarmas para el caso de que se sobrepasen. A medida que va avanzando la obra, la instrumentación realizada en el túnel con la fibra óptica va registrando los valores obtenidos de forma continua o semicontinua, lo cual permite conocer en cada momento las posibles disfunciones que se producen en la sección (ovalizaciones, microdeformaciones, nuevas fisuras, etc.) y actuar en consecuencia. El período previsto para la ejecución de la obra son 18 meses, una vez acabada la obra se podría mantener la instrumentación y hacer lecturas cuando por ejemplo se produjeran incidencias y se quisiera valorar su repercusión en la estructura del túnel del cual se va obteniendo su “historia de cargas”.

La fibra óptica, que como sistema de monitorización continua es resistente al agua y a la corrosión, soslaya problemas de interferencias electromagnéticas y corrientes parásitas que se producen en otras técnicas, y permite lecturas simultáneas de hasta 5000 puntos de la estructura en estudio.

El objetivo de este trabajo es constatar que no se ve afectado estructuralmente un túnel durante el período de construcción de un edificio, a través de la instrumentación de secciones del primero en las que se miden las microdeformaciones que se producen, y que se comparan con las del modelo. De esta manera, se podrán apreciar las ovalizaciones y tensiones en la bóveda durante las distintas fases del proceso constructivo.

2. MODELIZACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL TÚNEL

La modelación de las distintas etapas se realizó con el programa SAP2000 y el PLAXIS de dos dimensiones, y dio, a partir de la geometría definida en la Figura 1, los siguientes resultados indicados en la Tabla 1 y Figura 2:

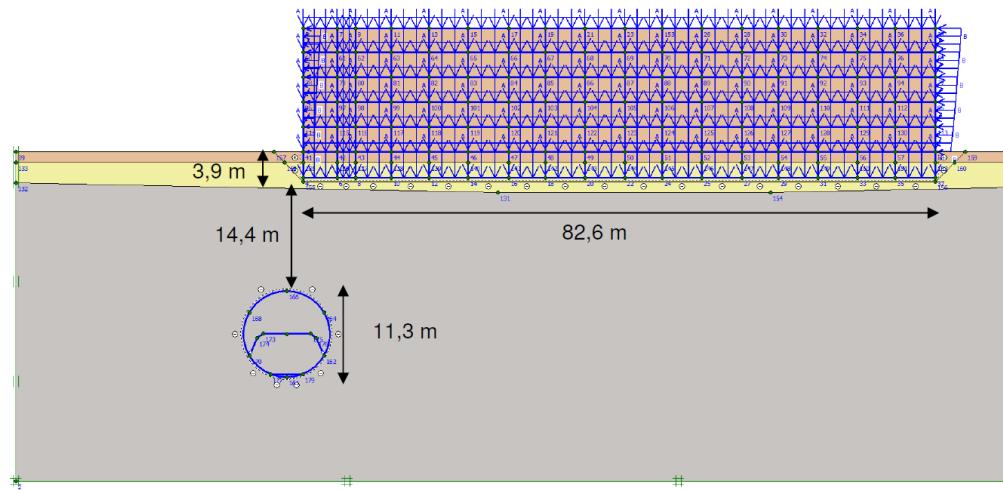


Figura 1. Geometría de la sección de cálculo.

Tabla 1. Resultados obtenidos en el modelo

	En situación actual	Fase de excavación de aparcamiento	Fase de explotación del edificio
Esfuerzos en revestimiento del túnel			
N _k (kN/m)	1.430	1.410	1.700
V _k (kN/m)	39,63	38,44	45,04
M _k (kN·m/m)	33,45	34,10	61,66
Desplazamientos máximos en el túnel			
Horizontal (mm)	0 (*)	1,49	-2,98
Vertical (mm)	0 (*)	1,63	-7,18

(*) La situación actual se adopta como situación de referencia, es decir, estado de deformación 0.

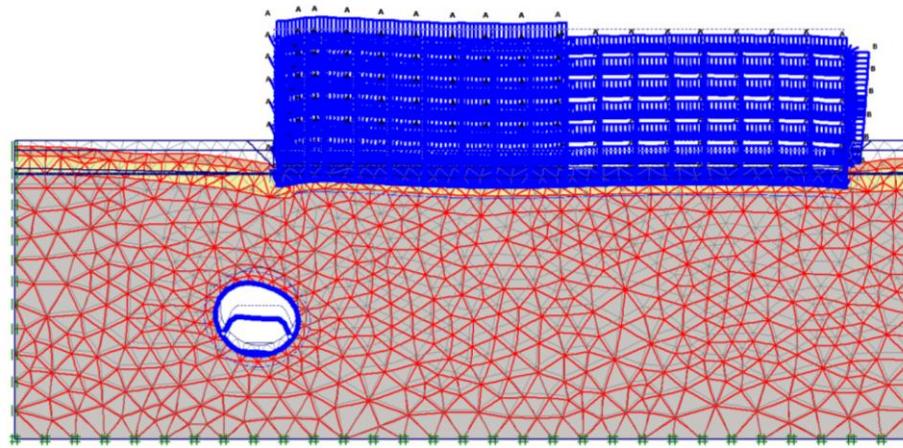


Figura 2. Primer mecanismo de rotura encontrado, para un factor de seguridad de 2,29.

Como consecuencia de lo anterior se estableció un plan de contingencias que se resume en la Tabla 2:

Tabla 2. Tensiones y deformaciones máximas en dovelas. Plan de contingencias.

	Valores de las zonas de compresión		Valores de la zona de tracción
	Dovelas		Dovelas
	$\Delta\sigma$ (Mpa)	$\Delta\mu\epsilon$	Ancho de fisura $\Delta\delta$ (mm)
Aviso	18.40	755	0.50
Alerta	28.40	955	1.80
Alarma	33.40	1595	3.50

El túnel instrumentado de la L9 es una sección típica con vías superpuestas y losa intermedia. La fibra óptica se ha colocado en el perímetro de la sección transversal, siempre de acuerdo con la Propiedad. La Figura 3 muestra su colocación. La colocación de fibra se ha llevado a cabo siguiendo el perímetro de una sección transversal en la posición indicada en planta.

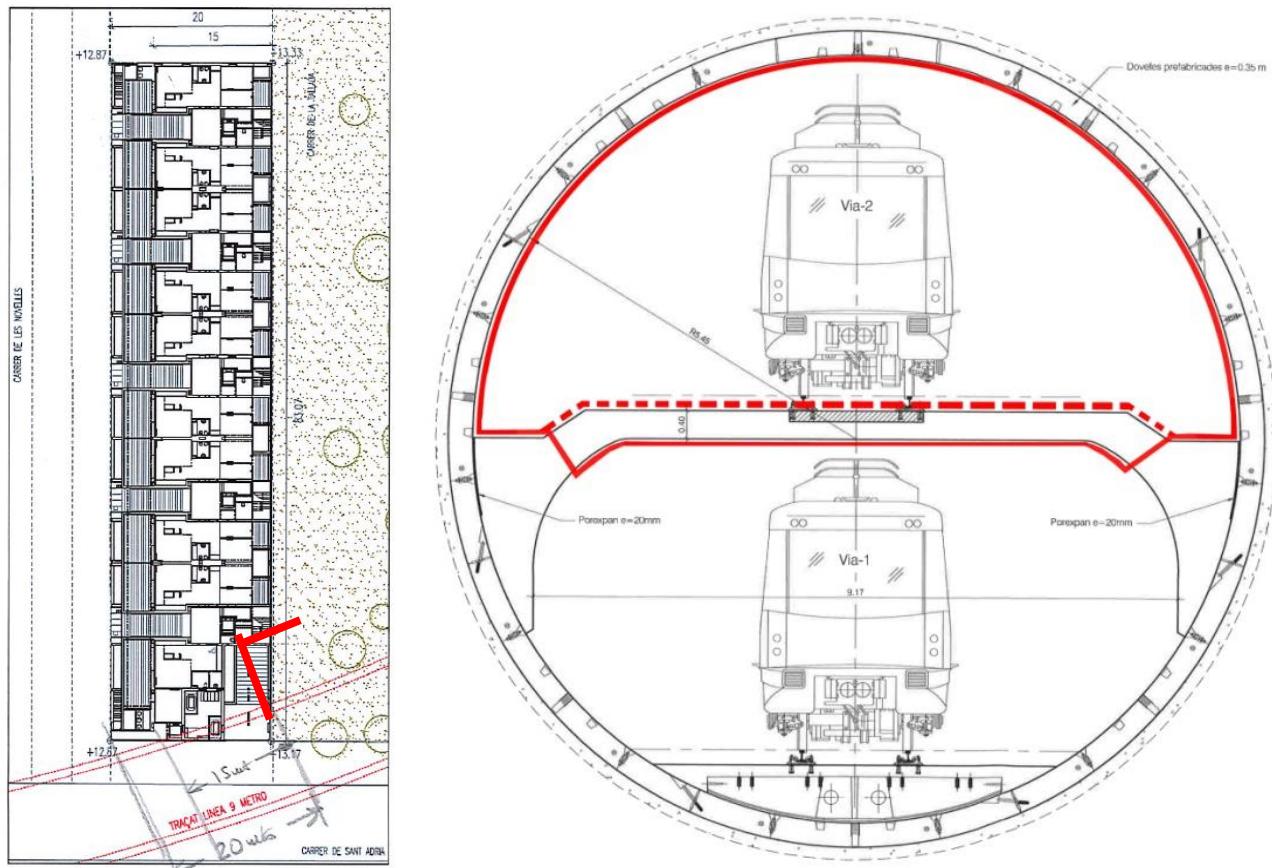


Figura 3. Planta de detalle del edificio con relación al túnel del metro y sección del trazado de la fibra óptica.

La instrumentación planteada mide microdeformaciones en la sección transversal del túnel, es decir, los posibles movimientos o disfunciones de la sección transversal.

En la lectura inicial de ceros con la fibra óptica se hace un catálogo de las disfunciones actuales (fisuras, humedades, coqueras, rugosidades anómalas, etc.). La Figura 4, la Figura 5 y la Figura 6 muestran algunas de las disfunciones detectadas en la toma de datos inicial.

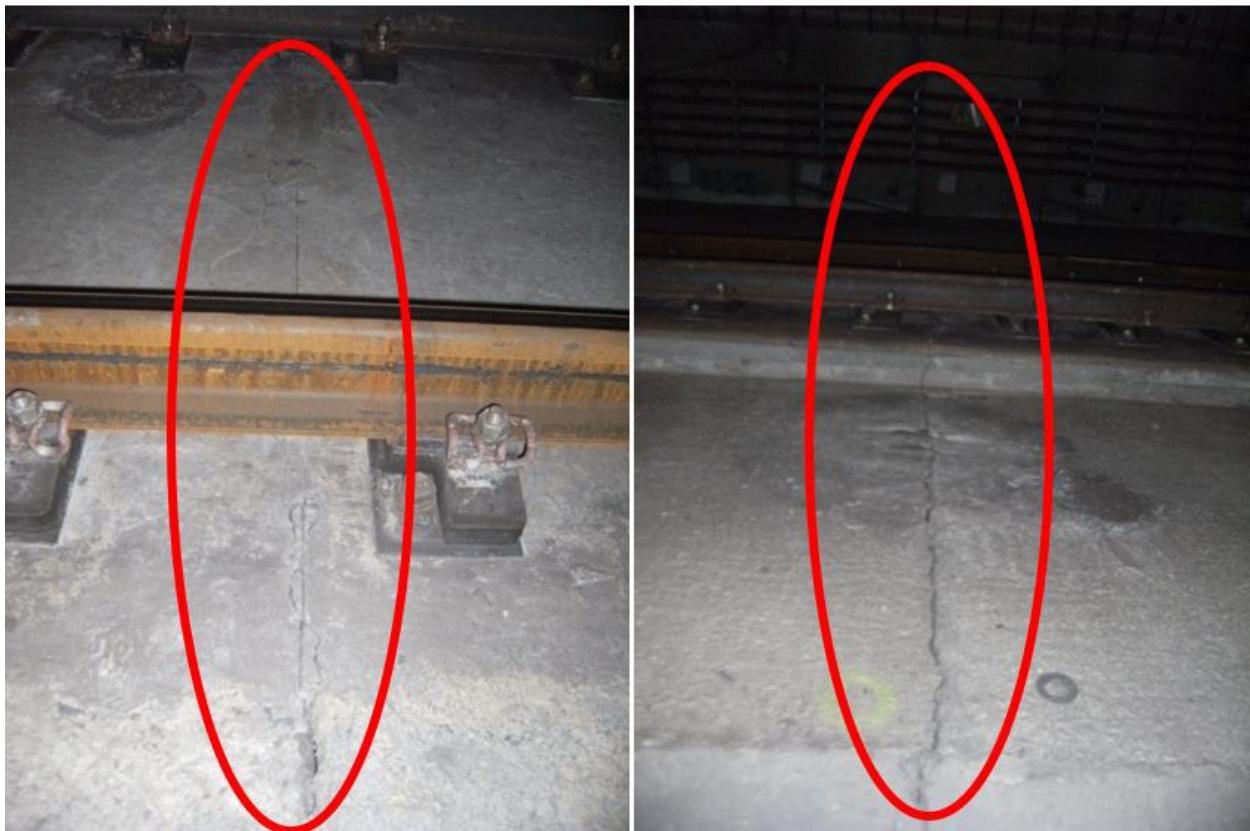


Figura 4. Juntas en la losa de vías, que existen cada 25m.



Figura 5. Filtraciones (lixiviaciones de las cales del cemento).



Figura 6. Rugosidad y pernos de sujeción que podrían afectar a la colocación de la fibra.

En cada lectura posterior planteada en las diferentes fases de la obra (previa al inicio, vaciado, finalización de la cimentación, estructura y fin de la obra), se miden las microdeformaciones en los perímetros de las secciones transversales, se comparan con el modelo realizado y se emiten informes. Cuando se sobrepase los criterios de ovalización prescritos en la normativa o se detecten disfunciones, se actuará de acuerdo con el protocolo del plan de contingencias establecido.

Lo anterior permite detectar los principales cambios en el comportamiento estructural del túnel y obtener información que servirá para evaluar su seguridad estructural, durante la construcción del edificio, al final de las obras y a lo largo de su vida útil.

2.1 Esquemas de posicionamiento

Todo el sistema de monitorización se ha situado en la zona estratégica susceptible a la posible dinámica y evolución de la respuesta estructural (variaciones de microdeformaciones-tensiones, movimientos, posibles incrementos y/o desarrollo de mapas de fisuración, etc.) del túnel a lo largo de los trabajos de construcción del edificio. Este sistema de instrumentación ha sido seleccionado considerando las condiciones de trabajo a las que estará sometido (variación térmica, condiciones de uso, etc.).

A continuación, se muestra el alcance de la monitorización empleada (ver Figura 7).

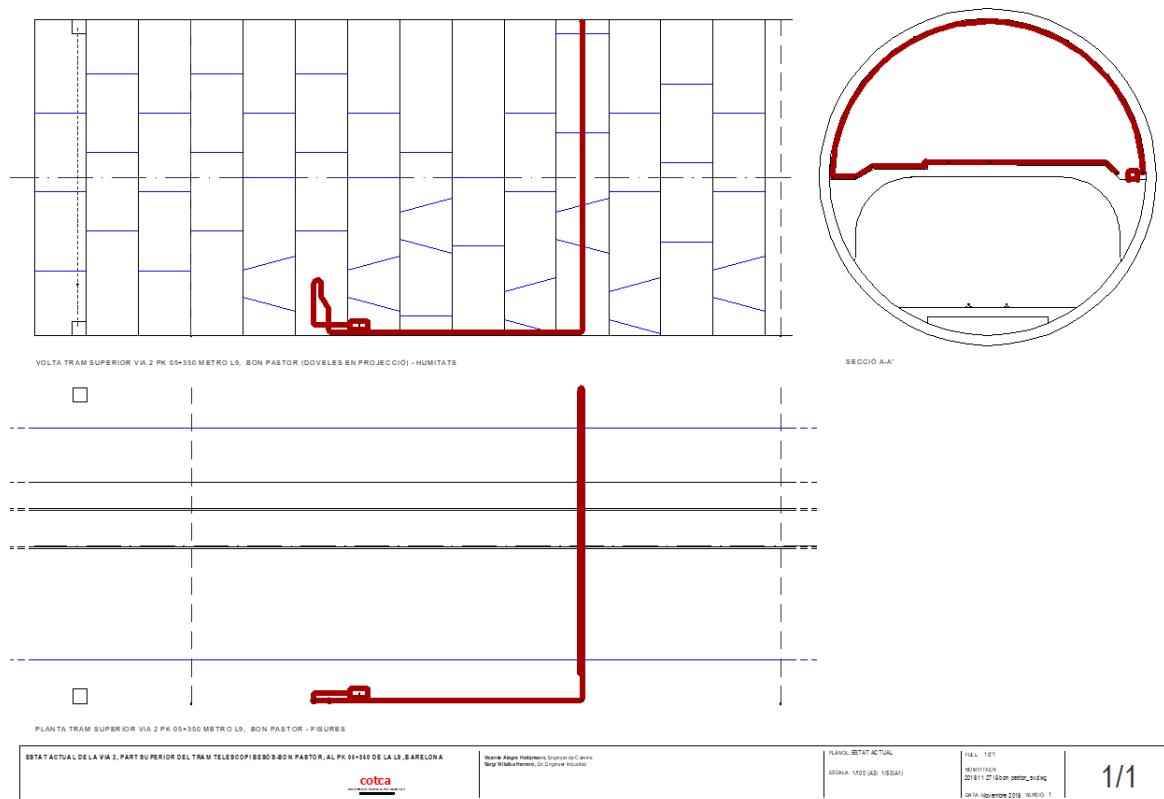


Figura 7. Esquema general del túnel. Alzado y planta. La línea roja indica el recorrido de la fibra óptica.

La longitud real de monitorización del túnel se ajusta a la longitud real de una sección transversal y un tramo longitudinal, siendo ésta una distancia de 50.00m de longitud. Es decir, la fibra óptica FOD1 (Fibra Óptica Distribuida) se encuentra adherida 40m y los últimos 10m se mantuvieron en el carrete que contiene la fibra óptica (sin adherir), el cual se fijó a la estructura con cinta americana. Este detalle se observa en las Figura 8, Figura 9 y Figura 10, junto con el sistema instalado dentro de la sección transversal del túnel.



Figura 8. Carrete de fibra óptica restante sujeto a la estructura y ODiSI (Optical Distributed Sensor Interrogator, de LUNA Technologies, Model A50) en funcionamiento.



Figura 9. Vista general del túnel en la sección instrumentada.



Figura 10. Fibra óptica protegida bajo las vías del tren.

En la Figura 11 se visualiza el procedimiento de adherencia realizado con la fibra óptica en la losa del carril de circulación de la vía 2 y en la bóveda del túnel.



Figura 11. Procedimiento de adherencia de la fibra óptica en la losa del carril de circulación de la vía 2 y en la bóveda del túnel.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1 Resultados del modelo

Se han obtenido tensiones y desplazamientos en el túnel antes, durante y después de la construcción del edificio mediante un método de cálculo por elementos finitos en hipótesis de deformación plana. El programa informático empleado es el PLAXIS v8.

A continuación, se detallan los resultados más significativos obtenidos a partir de la monitorización planteada. La Figura 12 muestra el tramo de sección del túnel con la tramificación de la FOD.

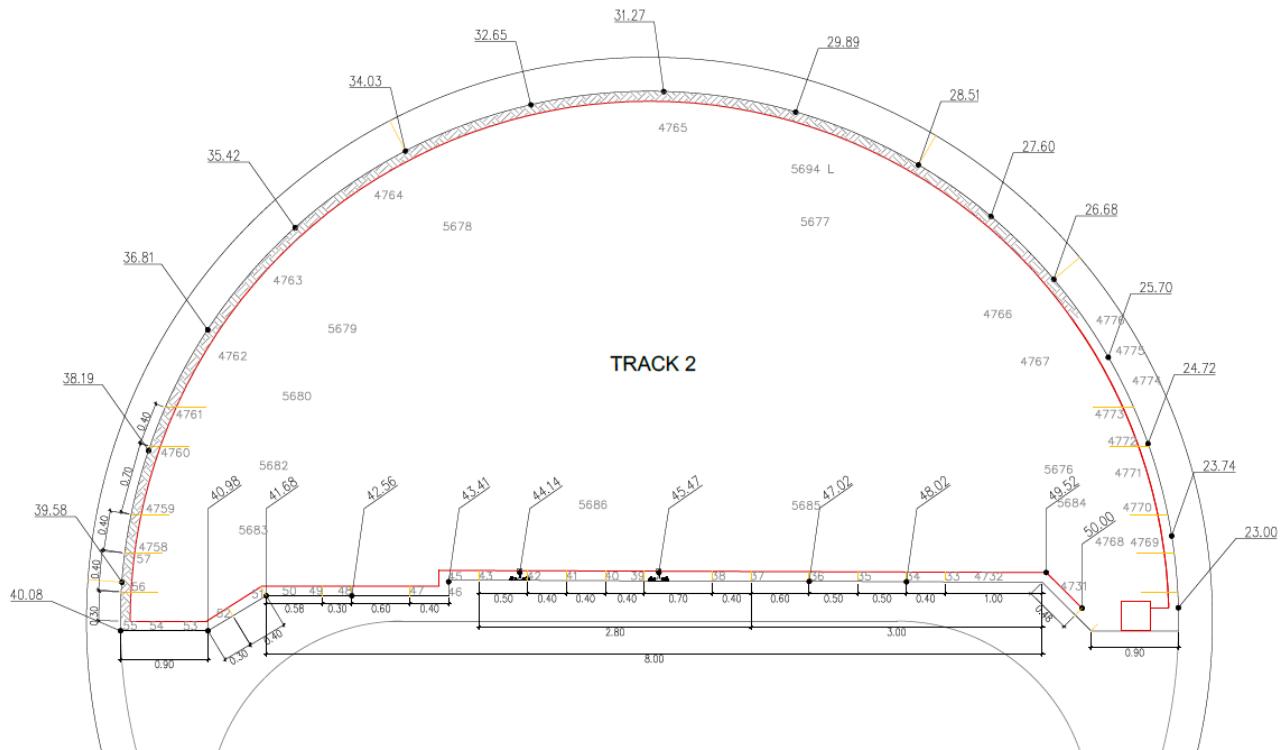


Figura 12. Tramo de sección del túnel y tramificación de la FOD.

La siguiente Tabla 3 muestra la identificación de las Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16 y Figura 17 con el proceso de obra realizado:

Tabla 3. Identificación de figuras.

Figura	Proceso de obra	Día / Rango de días	Longitud de FOD
Figura 13	Estado inicial	4 oct.	Longitud total: 50 m
Figura 14	Pre-excavación	7 oct.	Longitud total: 50 m
Figura 15	Excavación	18 oct. – 07 nov.	Longitud total: 50 m
Figura 16	Hormigonado cimentación	13 dic.	Longitud total: 50 m
Figura 17	Evolución temporal	4 oct. – 17 may.	Longitud total: 50 m

ESTADO INICIAL

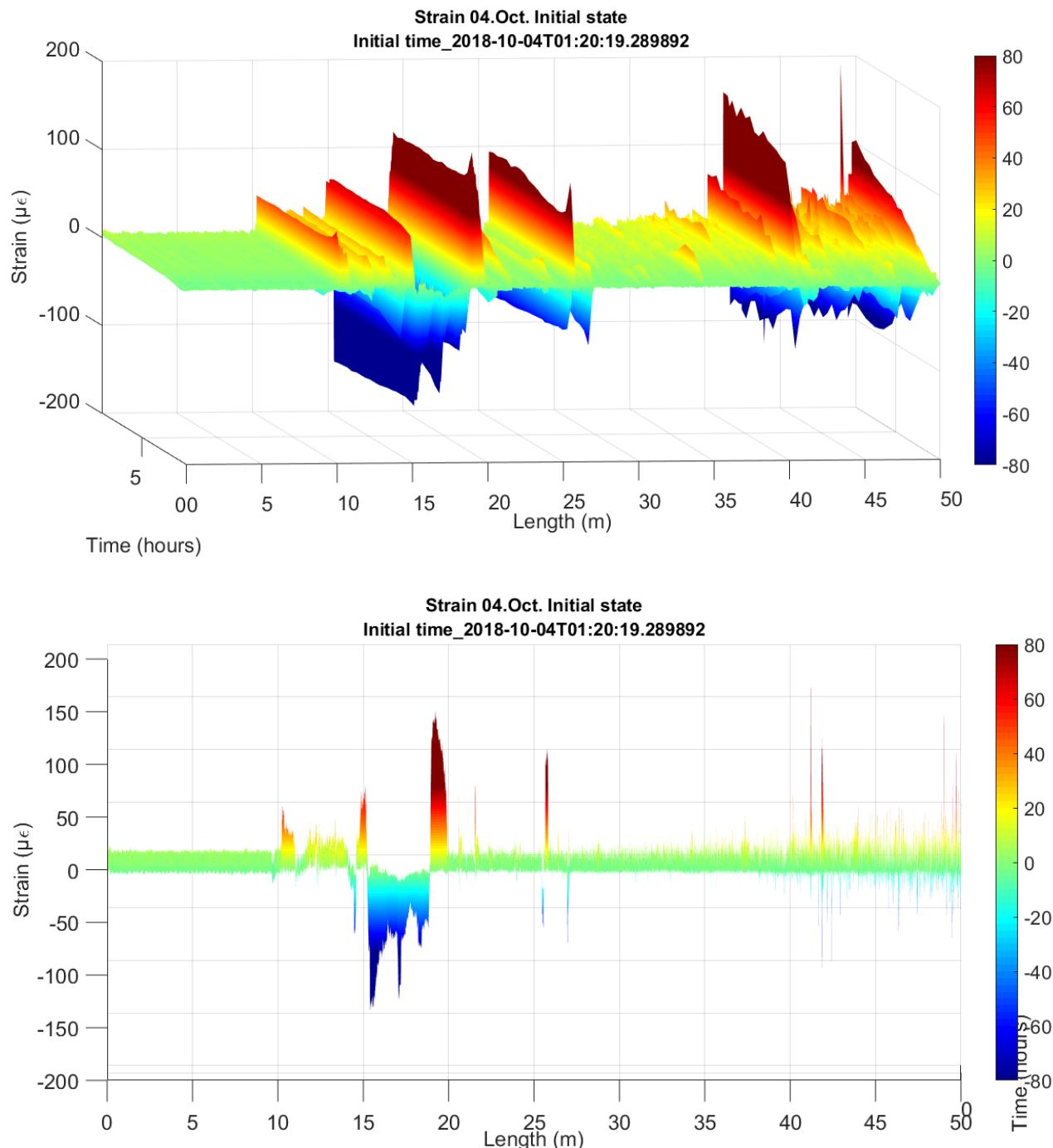


Figura 13. Estado inicial y de calibrado. Longitud 50m de FOD. Vista axonométrica y frontal.

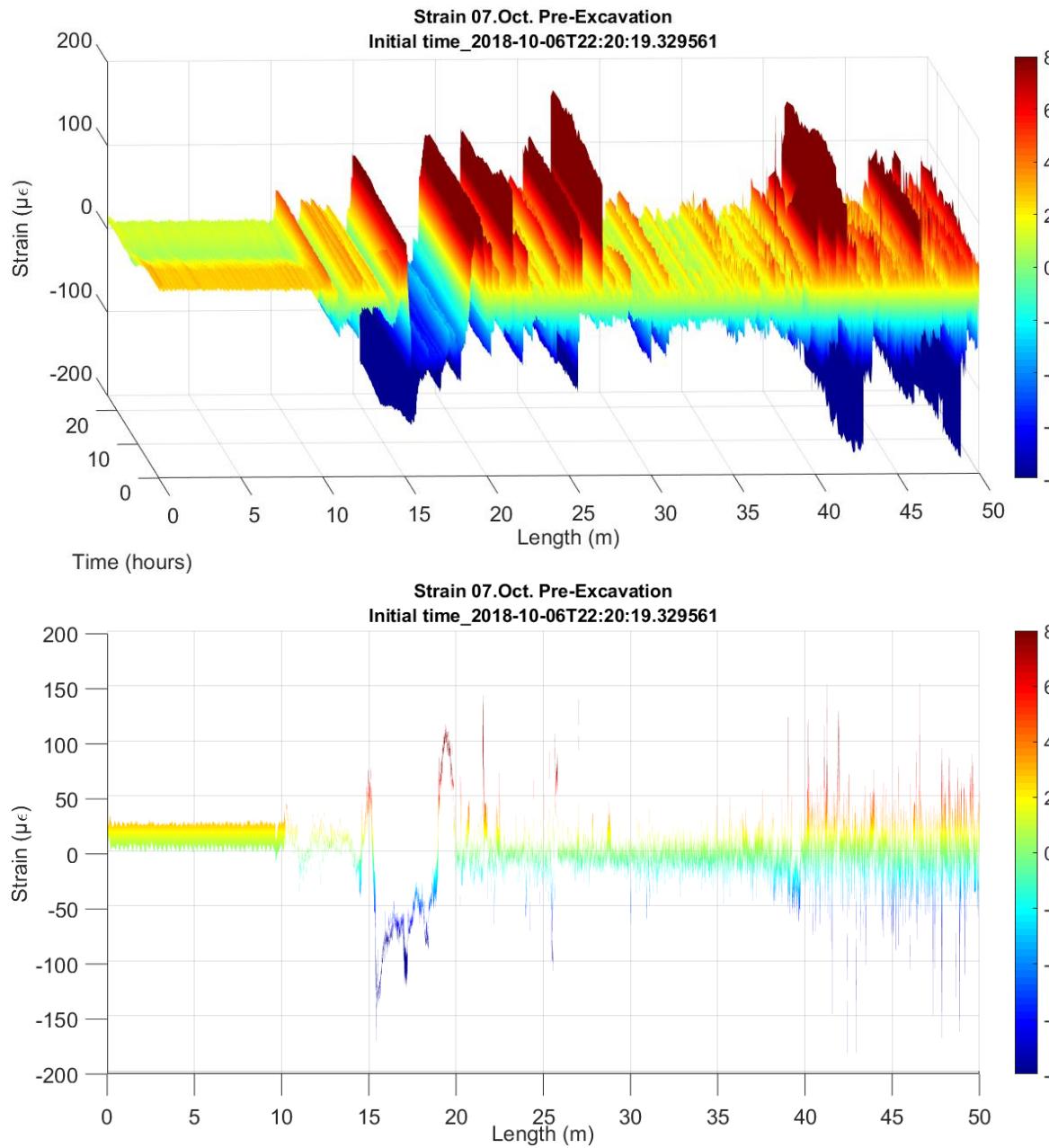
PRE EXCAVACIÓN

Figura 14. Pre-excavación. Longitud 50m de FOD. Vista axonométrica y frontal.

EXCAVACIÓN

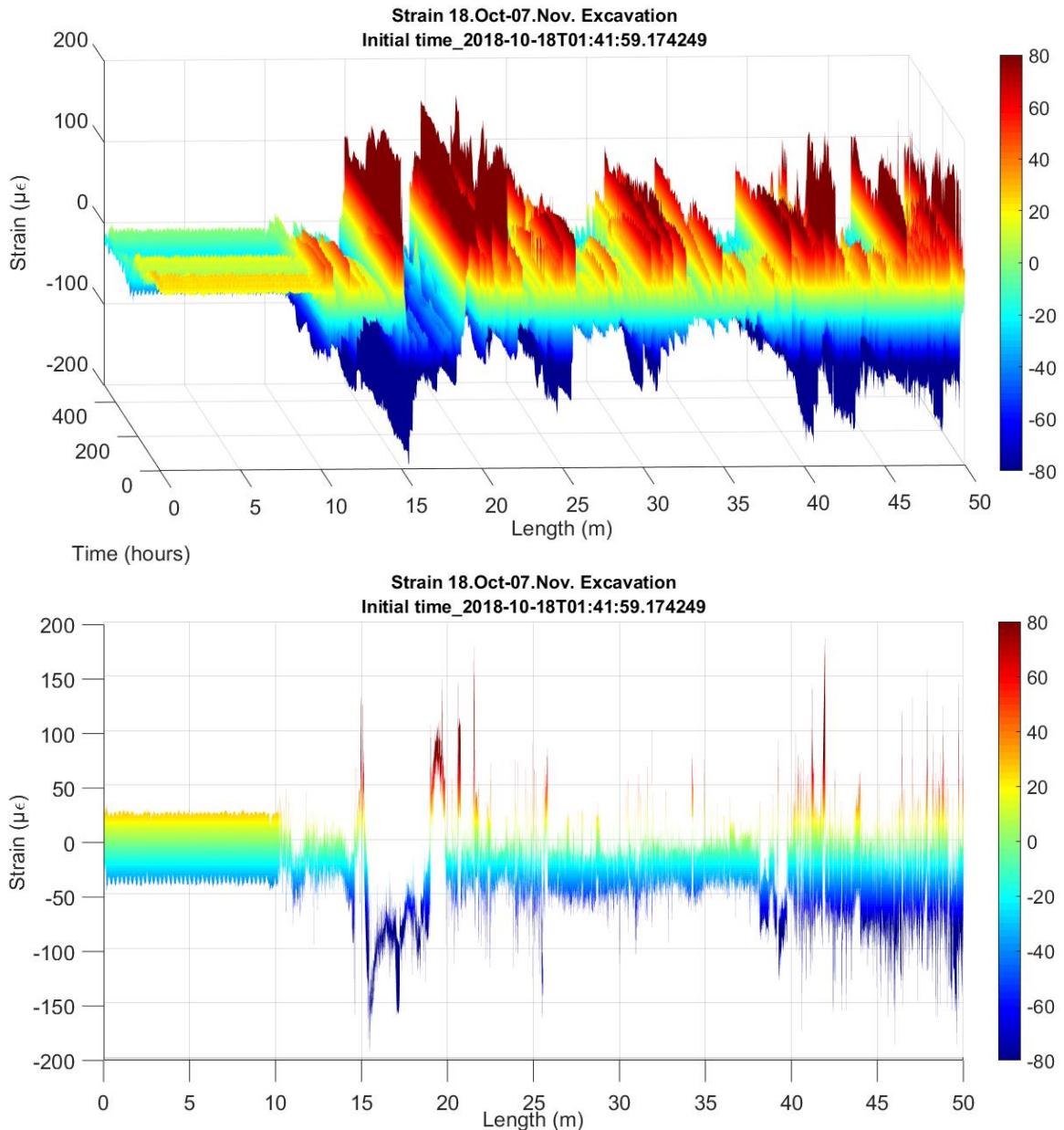


Figura 15. Excavación completa. Longitud 50m de FOD. Vista axonométrica y frontal.

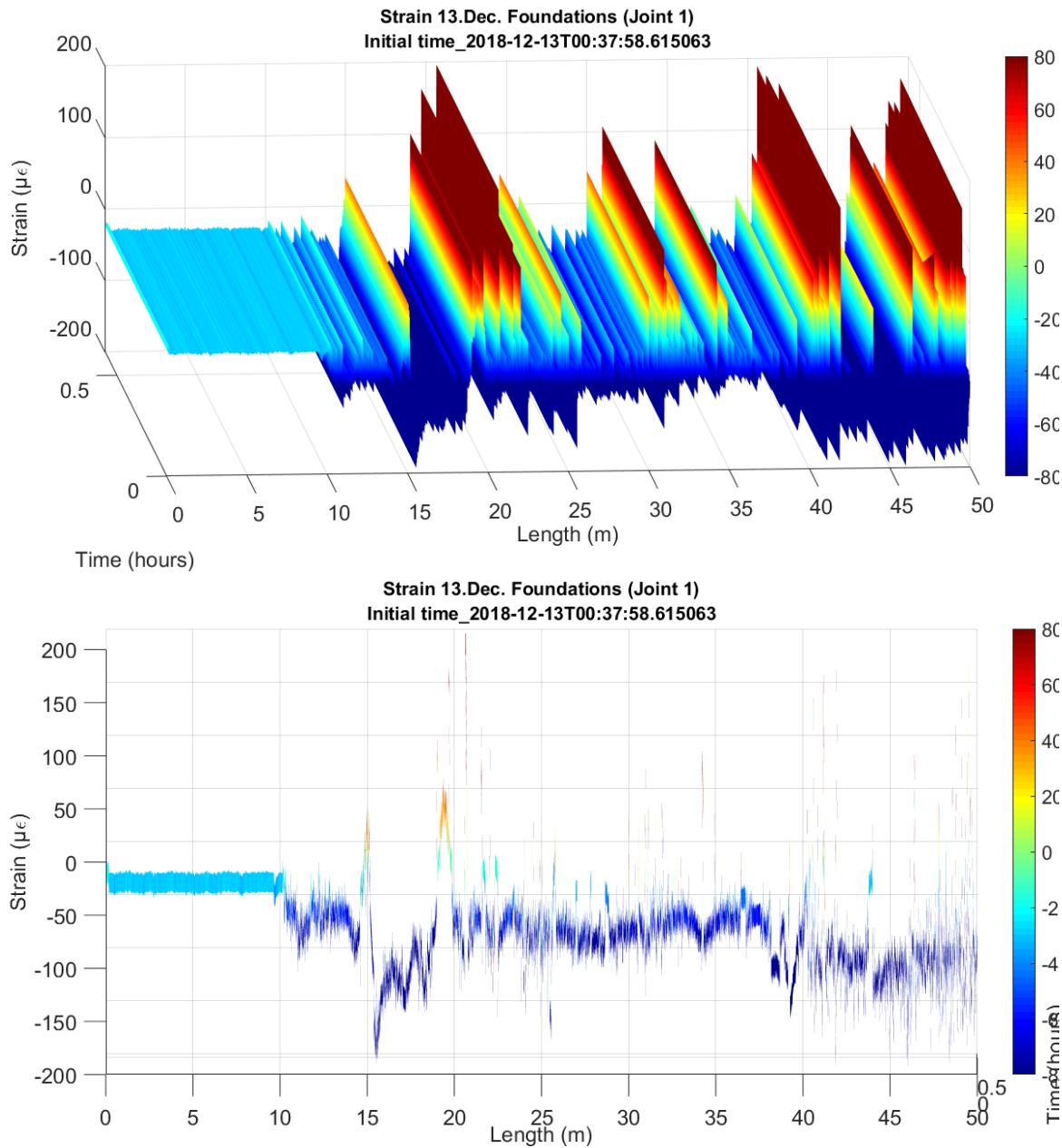
EXECUCIÓN 1ER TRAMO CIMENTACIÓN

Figura 16. Ejecución primer tramo de losa de cimentación. Longitud 50m de FOD. Vista axonométrica y frontal.

EVOLUCIÓN TOTAL

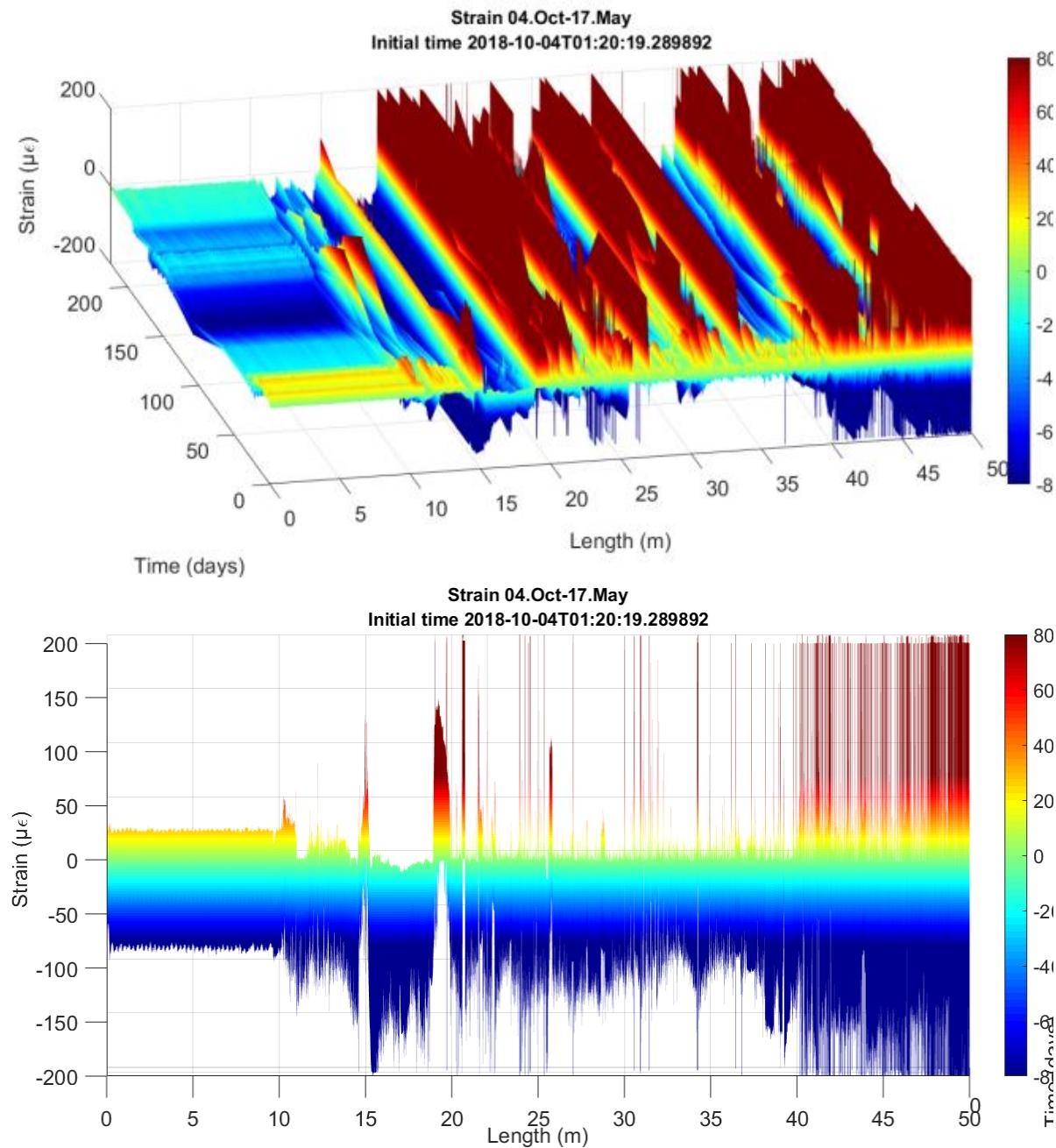


Figura 17. Evolución temporal de 4 de octubre y el 17 mayo. Longitud 50m de FOD. Vista axonométrica y frontal.

A continuación, en las Figura 18 y Figura 19, se incorpora el registro de lecturas en 6 puntos críticos a lo largo de la sección de la bóveda del túnel.

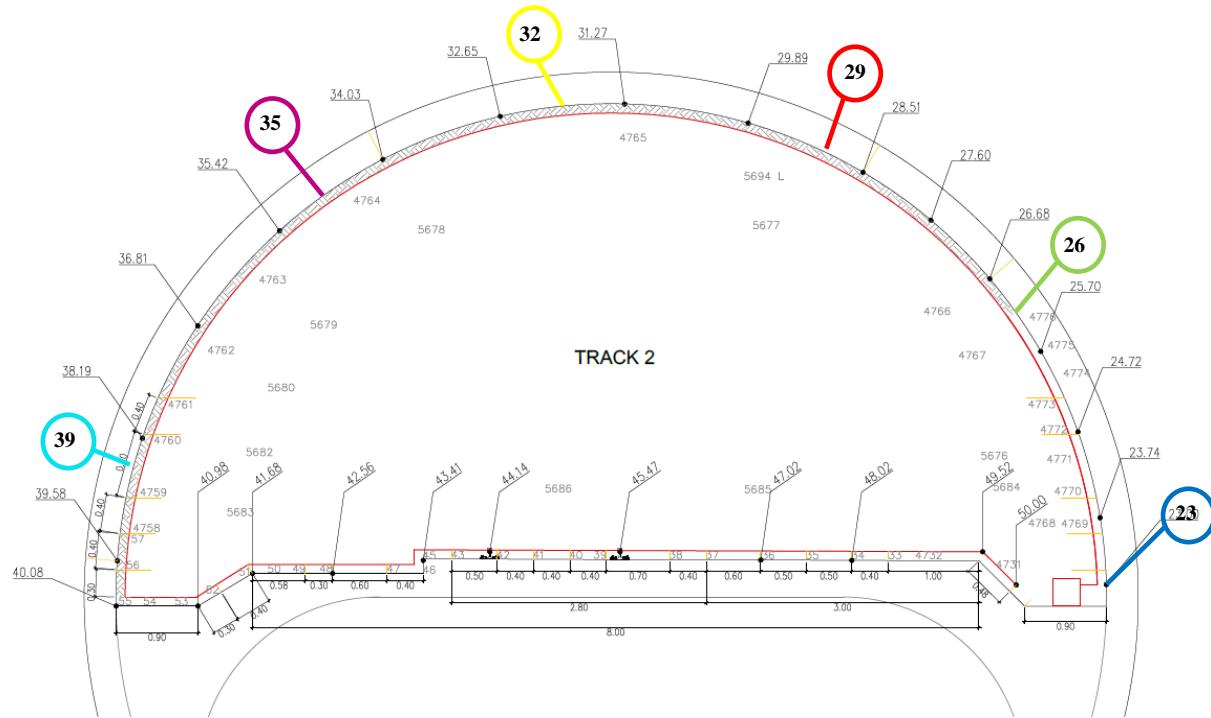


Figura 18. Identificación de puntos críticos de control en la bóveda del Túnel.

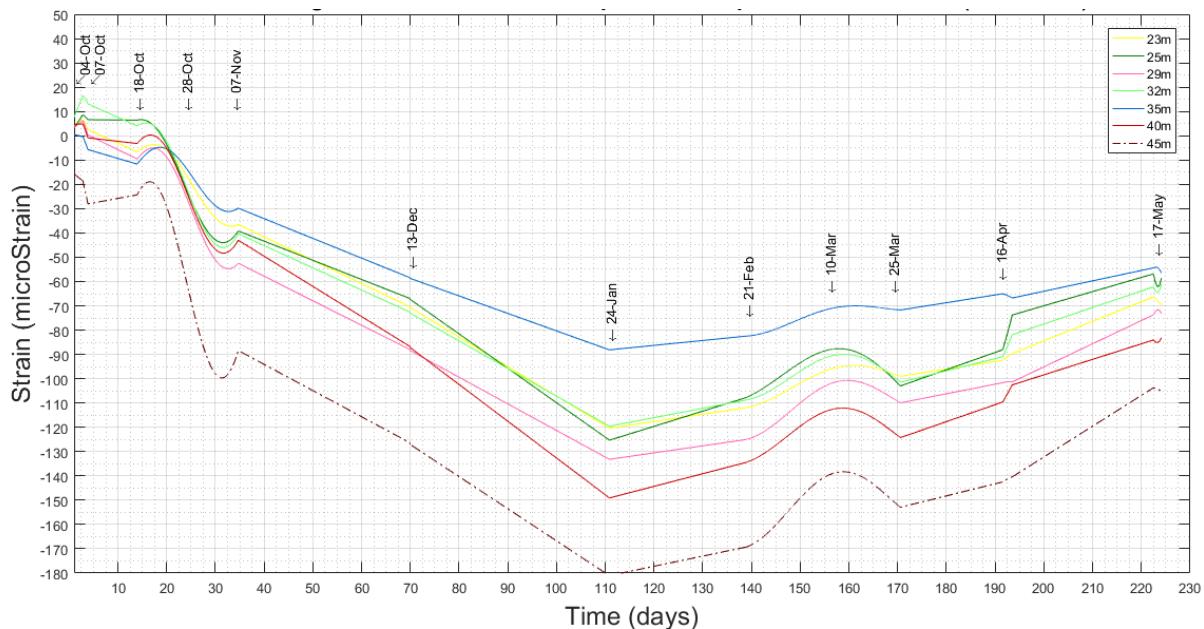


Figura 19. Evolución temporal del 4 de octubre de 2018 al 17 de mayo de 2019 en puntos críticos de control.

De forma general se observa que:

- 1) El tramo de fibra comprendida entre 40 y 50m → corresponde a la zona de vías. En este tramo es donde hay más excitación de la fibra dado el paso ferroviario. La vibración originada por el paso ferroviario produce que en este tramo haya más distorsión de lecturas. Aún y así, se observa como estas variaciones de microdeformaciones registradas tienen una tendencia de incremento a compresión, lo cual es coherente respecto a la descompresión y ovalización que sufre la sección curva del túnel y que genera que la losa haga una función de puntal ante esta acción. La ovalización del túnel se explica en el siguiente punto. Asimismo, en ningún caso los valores obtenidos superan la linde de aviso establecida en el Plan de Auscultación y Contingencias.
- 2) El tramo de fibra comprendida entre 23 y 40m → corresponde a la zona de la bóveda. En este tramo se observa cómo, de forma general, ha habido un incremento de microdeformaciones de compresión a lo largo de la instrumentación. Éste es debido a la descompresión originada por la excavación y vaciado de tierras de la obra, de forma que 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 se comprime y la fibra exterior de la sección de descomprime). Se puede observar claramente como se pasa de un color verde (deformación nula e inicial) a un color azul que indica compresión. Asimismo, en ningún caso los valores obtenidos superan la linde de aviso establecida en el Plan de Auscultación y Contingencias. Respecto al 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, para un estado o estadio elástico donde las tensiones de las fibras del hormigón de la sección son proporcionales a las deformaciones, se desprende que, aun observando este incremento de $\mu\varepsilon$, estas no inducen unas tensiones excesivas en la misma.
- 3) El tramo de fibra comprendida entre 10 y 23m → corresponde al tramo de monitorización longitudinal. En esta zona se observan valores a compresión y a tracción, pero que a lo largo de su evolución han estado en todo momento constantes, es decir, sin variación respecto el origen de las lecturas y de calibrado. Este hecho indica que en este tramo no ha habido variaciones en respuesta de la estructura, es decir, que las actuaciones realizadas no han originado cambios de respuesta apreciables en la estructura.
- 4) El tramo de fibra comprendida entre 0 y 10m → 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 substanciales de temperatura que induzcan variaciones tensionales importantes, de forma que no influyen en el resto de zonas de FOD adherida.

Asimismo, se pueden apreciar picos y/o discontinuidades obtenidas 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 lo que respecta a su ubicación.

4. CONCLUSIONES

El uso de sensores de fibra óptica (Optical Backscatter Reflectometer) es una tecnología prometedora para la monitorización del estado estructural, ya que permite la posibilidad de un monitoreo continuo en el tiempo y el espacio de la tensión y la temperatura a lo largo de la fibra. Se está realizando la monitorización de un tramo de túnel, que ha supuesto, hasta la fecha, un control de la estructura en servicio durante los ocho meses (octubre 2018 – mayo 2019) que abarcan las obras de construcción de la estructura de un edificio sobre la vía, hasta el nivel de planta 1^a, en la zona de edificio sobre el túnel.

La monitorización ha servido para identificar y caracterizar técnicamente los incrementos de

tensiones de tracción y compresión, como consecuencia de las distintas fases de la obra, desde antes de comenzar, con las lecturas de calibración previas hasta la fase de construcción de la estructura, en que nos encontramos. La monitorización continuará hasta el final de la obra, prevista en noviembre de 2020.

Durante este periodo de 8 meses, las variaciones de microdeformación de la fibra FOD 1 han sido de $153\mu\epsilon$ que traducidas a tensiones suponen una variación de tensión máxima de 5,75MPa.

Estos valores son aceptables para este tipo de estructuras, por tratarse de valores de compresión en el hormigón. Por otra parte, en estos valores están incluidos los efectos térmicos.

A partir de las variaciones obtenidas en la monitorización de la fibra FOD 1 a lo largo de este medio ciclo térmico, se puede considerar que la repercusión de la acción térmica en el túnel ha sido despreciable

Una vez confirmado que túnel se encuentra en unas condiciones de seguridad adecuada y una vez acabada la obra, se dispondrá de un registro permanente para acceder a la sección, y poder realizar lecturas intermitentes a lo largo de su vida útil para conocer el comportamiento diferido. Esto se ha planteado dentro del preceptivo plan de mantenimiento del túnel.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los técnicos del IMHAB (Institut Municipal del Habitatge i Rehabilitació de Barcelona) y TMB (Transports de Barcelona, S.A.) las facilidades dadas para la gestión de todas las operaciones.

6. BIBLIOGRAFÍA

Li, H., Li, D., Song, G. (2004), “Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering”. *Engineering Structures*, Volume 26, Issue 11, pp. 1647–1657. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.05.018>

Villalba, S., Casas, J. R. (2009), “Feasibility of Structural Health Monitoring of concrete structures by Optical Backscatter Reflectometer”. Proceedings of 7th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford University (USA).

Alegre, V., Villalba, S. (2013), “Estructuras inteligentes. Instrumentación con fibra óptica”. XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción. CONPAT-2013. Colombia 2013. ISBN 978-958-58090-0-0.

Alegre, V., Villalba, S., Force, F., Ródenas, V. (2015), “Apeo y sustitución de un pilar de fábrica de ladrillo en un edificio modernista en uso”. XIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XV Congreso de Control de Calidad en la Construcción. CONPAT-2015. Lisboa 2015.

Alegre, V., Villalba, S. (2017), “Avances en la instrumentación con fibra óptica”. XIV Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVI Congreso de Control de Calidad en la Construcción. CONPAT-2017. Vol. I. Control de Calidad. ISBN 978-99967-0-464-2.