

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

V. Alegre^{1*}, S. Villalba² 

* Autor de Contato: info@cotca.com

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

Recepção: 14/11/2019 | Aceitação: 30/10/2020 | Publicação: 01/01/2021

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.

Palavras-chave: fibra ótica; instrumentação; túneis; microdeformações.

Citar como: Alegre, V., Villalba, S. (2021), "Avanços na instrumentação de estruturas com fibra ótica. O presente de uma instrumentação com 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.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor V. Alegre contribuiu para a gestão da persuasão das vantagens deste tipo de aplicações, e no processo de implementação no local de fibra ótica, definição da área ideal de acordo com as posições do edifício e do túnel, e comissionamento. O autor S. Villalba desenvolveu o modelo utilizado para a interpretação dos resultados, realizou o plano de leitura previsto de acordo com as fases de construção e analisou e interpretou os resultados obtidos e as suas conclusões ao longo do processo de construção.

Licença Creative Commons

Este trabalho foi publicado sob os termos de uma Licença Internacional Creative Commons Attribution 4.0 International ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 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

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

RESUMEN

Se discute el ejemplo de un caso real en el que, sobre un túnel existente, se construye un edificio con instrumentación de fibra óptica que permite hacer el seguimiento de la historia de cargas de una estructura desde su instalación. Para constatar que no se ve afectado estructuralmente el túnel durante el período de construcción, se instrumentan secciones de este 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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310. As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Um problema técnico frequente é a interação entre os novos canteiros de obras e a infraestrutura existente. As diferentes partes de uma infra-estrutura são geridas para uma determinada vida útil, como é o caso da Rede do Metrô de Barcelona, cujo estado atual foi definido de forma ordenada entre 2000 e 2003 deixando, entre outros documentos, um túnel virtual de 92km a partir daí, com a geometria da seção transversal e a lista de danos e disfunções para a sua gestão. Os primeiros quilômetros do túnel datam de 1924 e, logicamente, a administração responsável (Generalitat de Catalunya) e a entidade que o gere (Transports de Barcelona, SA) obrigam que os novos edifícios construídos dentro da área de influência das suas infra-estruturas sejam verificados se eles não afetam o uso e o serviço da rede, ou sua estrutura. Para isso, entre outras coisas, exige que a área afetada seja avaliada estruturalmente, fornecendo as informações estruturais disponíveis, e que sejam registrados os movimentos que ocorrerem na infraestrutura durante a construção da nova obra, agindo de acordo.

Para fazer isso, às vezes as medições são feitas com teodolitos monitorados em vários pontos da seção transversal. Se se deseja mais precisão para avaliar os riscos, uma ferramenta muito válida é a tecnologia da fibra óptica que, aderida à superfície, permite medir microdeformações, por exemplo, nas seções transversais centímetro a centímetro.

Essa tecnologia consiste na utilização de um refletômetro óptico de retroespalhamento denominado sistema OBR (Optical Backscatter Reflectometer) como ferramenta de monitoramento, neste caso, de uma estrutura de concreto armado de um túnel com segmentos da Linha 9 em Barcelona, que poderia apresentar fissuras ou disfunções em serviço, em consequência da construção de um edifício parcialmente efetuado na referida seção do túnel.

A principal característica do sistema OBR é sua grande sensibilidade e alta resolução espacial através do uso de fibra óptica como sensor. Isso produz registros de deformação nos quais a presença de fissuras pode ser identificada e localizada.

Ao longo deste túnel será construído um edifício, estando todo o processo modelado: fundação, laje de fundação, execução da estrutura e carregamento de todos os subsistemas que integram o edifício (fachadas, pavimentos, divisórias, instalações, ...).

Para essas etapas de carregamento, são estabelecidos os valores esperados, e é criado um plano de contingência com avisos, alertas e alarmes caso sejam ultrapassados. À medida que o trabalho avança, a instrumentação efetuada no túnel com a fibra óptica regista os valores obtidos de forma contínua ou semicontínua, o que nos permite conhecer a todo o momento as possíveis disfunções que ocorrem na seção (ovalizações, microdeformações, novas fissuras, etc.) e agir em conformidade. O prazo previsto para a execução da obra é de 18 meses, uma vez terminada a obra, poderá ser mantida a instrumentação e efetuadas leituras quando, por exemplo, ocorrerem incidentes e pretende-se avaliar o seu impacto na estrutura do túnel a partir do qual se encontra seu "histórico de carregamento".

A fibra óptica, que como sistema de monitoramento contínuo é resistente à água e à corrosão, evita problemas de interferência eletromagnética e correntes parasitas que ocorrem em outras técnicas, e permite leituras simultâneas de até 5.000 pontos da estrutura em estudo.

O objetivo deste trabalho é verificar se um túnel não é estruturalmente afetado durante o período de construção de um edifício, por meio da instrumentação de trechos do primeiro em que são medidas as microdeformações que ocorrem, e comparadas com o do modelo. Desta forma, as ovalizações e tensões na abóbada podem ser apreciadas durante as diferentes fases do processo de construção.

2. MODELAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DO TÚNEL

A modelagem das diferentes etapas foi realizada com o programa SAP2000 e o PLAXIS bidimensional, e apresentou, com base na geometria definida na Figura 1, os seguintes resultados indicados na Tabela 1 e Figura 2:

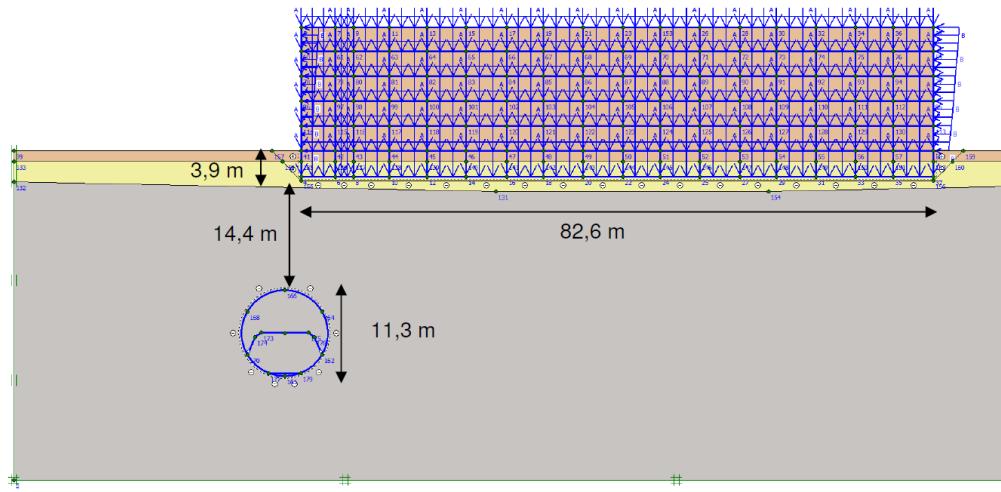


Figura 1. Geometria da seção de cálculo.

Tabela 1. Resultados obtidos no modelo.

	Na situação atual	Fase de escavação de estacionamento	Fase de uso do edifício
Esforços no revestimento do túnel			
Nk (kN/m)	1.430	1.410	1.700
Vk (kN/m)	39,63	38,44	45,04
Mk (kN·m/m)	33,45	34,10	61,66
Deslocamentos máximos no túnel			
Horizontal (mm)	0 (*)	1,49	-2,98
Vertical (mm)	0 (*)	1,63	-7,18

(*) A situação atual é adotada como situação de referência, ou seja, estado de deformação 0.

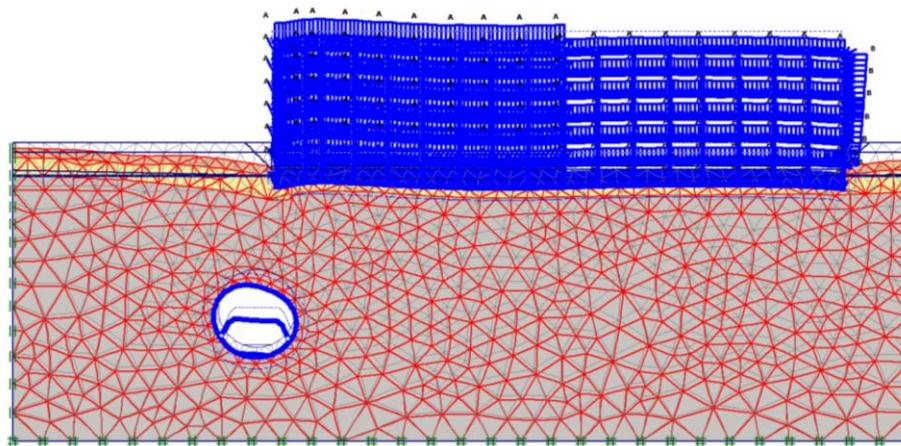


Figura 2. Primeiro mecanismo de falha encontrado, para um fator de segurança de 2,29.

Como consequência do exposto, foi estabelecido um plano de contingência, o qual está resumido na Tabela 2:

Tabela 2. Tensões máximas e deformações nos segmentos. Plano de contingência.

	Valores das zonas de compressão		Valores da zona de tração
	Aduelas		Aduelas
	$\Delta\sigma$ (Mpa)	$\Delta\mu\epsilon$	abertura de fisura $\Delta\delta$ (mm)
Aviso	18.40	755	0.50
Alerta	28.40	955	1.80
Alarme	33.40	1595	3.50

O túnel instrumentado L9 é uma seção típica com faixas sobrepostas e laje intermediária. A fibra óptica foi colocada no perímetro da seção transversal, sempre de acordo com a Propriedade. A Figura 3 mostra seu posicionamento. A colocação das fibras foi realizada seguindo o perímetro de uma seção transversal na posição indicada no plano.

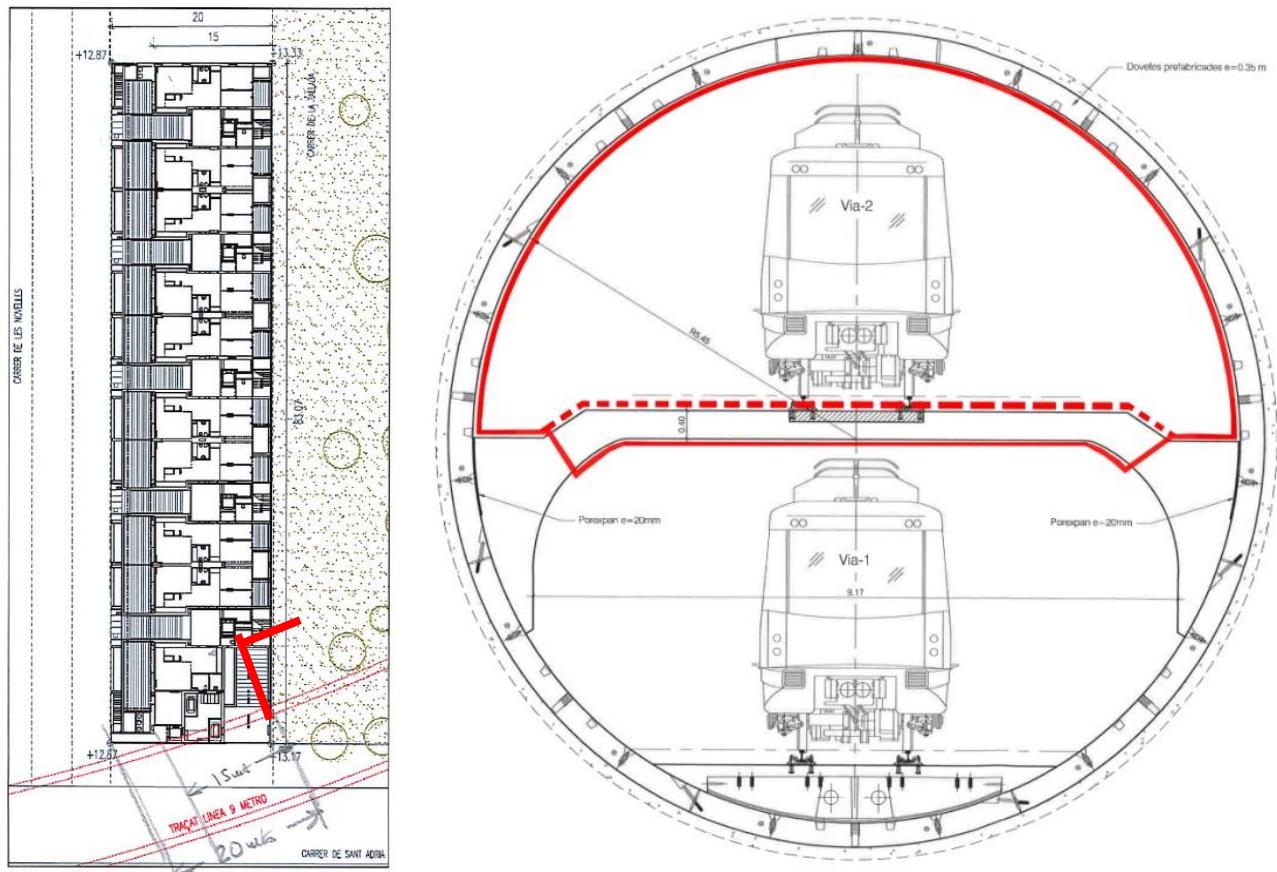


Figura 3. Planta detalhada do prédio em relação ao túnel do metrô e trecho da rota de fibra ótica.

A instrumentação proposta mede microdeformações na seção transversal do túnel, ou seja, os possíveis movimentos ou disfunções da seção transversal.

Na leitura zero inicial com a fibra óptica, é feita uma lista das disfunções atuais (fissuras, umidade, fissuras, rugosidade anormal, etc.) A Figura 4, a Figura 5 e a Figura 6 mostram algumas das disfunções detectadas na coleta inicial de dados.



Figura 4. Juntas na laje da via, existentes a cada 25m.



Figura 5. Vazamento (lixiviação da cal do cimento).



Figura 6. Rugosidade e parafusos de fixação que podem afetar a colocação da fibra.

Em cada leitura posterior colocadas nas diferentes fases da obra (antes do início, esvaziamento, acabamento da fundação, estrutura e final da obra), são medidas as microdeformações nos perímetros das seções transversais, comparadas com o modelo executado e emitido relatórios. Quando os critérios de ovalização prescritos nos regulamentos forem ultrapassados ou forem detectados defeitos, as ações serão tomadas de acordo com o protocolo do plano de contingência estabelecido.

Isto permite detectar as principais alterações no comportamento estrutural do túnel e obter informações que servirão para avaliar a sua segurança estrutural, durante a construção do edifício, no final das obras e ao longo da sua vida útil.

2.1 Esquemas de posicionamento

Todo o sistema de monitoramento foi localizado na zona estratégica suscetível à possível dinâmica e evolução da resposta estrutural (variações de microdeformações-tensões, movimentos, possíveis aumentos e/ou desenvolvimento de mapas de fissuras, etc.) do túnel ao longo da obra de construção civil. Este sistema de instrumentação foi selecionado considerando as condições de trabalho a que estará submetido (variação térmica, condições de uso, etc.).

O escopo do monitoramento usado é mostrado abaixo (ver Figura 7).

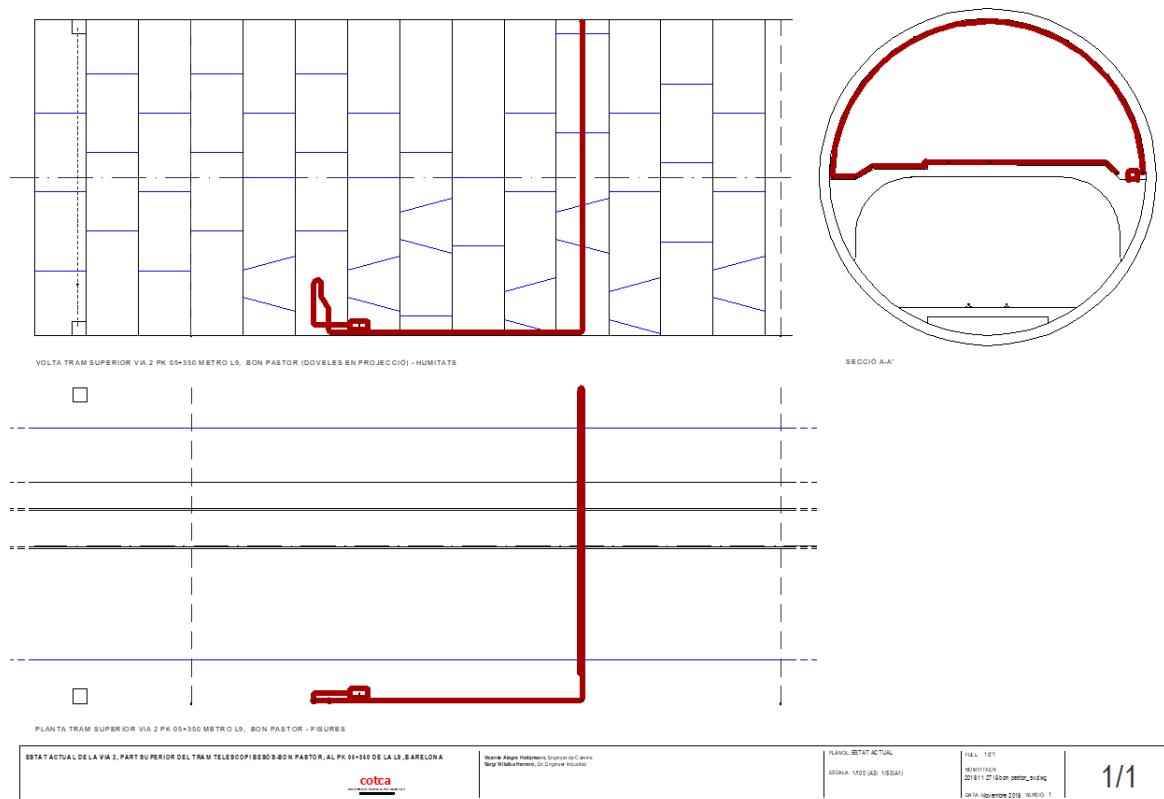


Figura 7. Esquema geral do túnel. Elevação e planta. A linha vermelha indica o caminho da fibra óptica.

O comprimento real de monitoramento do túnel é ajustado ao comprimento real de uma seção transversal e de uma seção longitudinal, sendo esta uma distância de 50,00m de comprimento. Ou seja, a fibra óptica FOD1 (Fibra Ótica Distribuída) é fixada 40m e os últimos 10m foram mantidos na bobina contendo a fibra óptica (não fixada), que foi fixada na estrutura com fita adesiva. Este detalhe pode ser visto na Figura 8, Figura 9 e Figura 10, juntamente com o sistema instalado dentro da seção transversal do túnel.



Figura 8. Carretel de fibra ótica restante sujeito à estrutura e ODiSI (Optical Distributed Sensor Interrogator, da LUNA Technologies, Modelo A50) em operação.



Figura 9. Vista geral do túnel na seção instrumentada.



Figura 10. Fibra ótica protegida sob os trilhos do trem.

A Figura 11 mostra o procedimento de aderência realizado com a fibra ótica na laje da via da pista 2 e na abóbada do túnel.



Figura 11. Procedimento de aderência de fibra ótica na laje da via 2 e na abóbada do túnel.

3. RESULTADOS e DISCUSSÃO.

3.1 Resultados do modelo

As tensões e deslocamentos no túnel foram obtidos antes, durante e após a construção do edifício por meio de um método de cálculo de elementos finitos na hipótese de deformação plana. O programa de computador usado é o PLAXIS v8.

Os resultados mais significativos obtidos com o monitoramento proposto são detalhados a seguir. A Figura 12 mostra a seção seccional do túnel com a tramificação FOD.

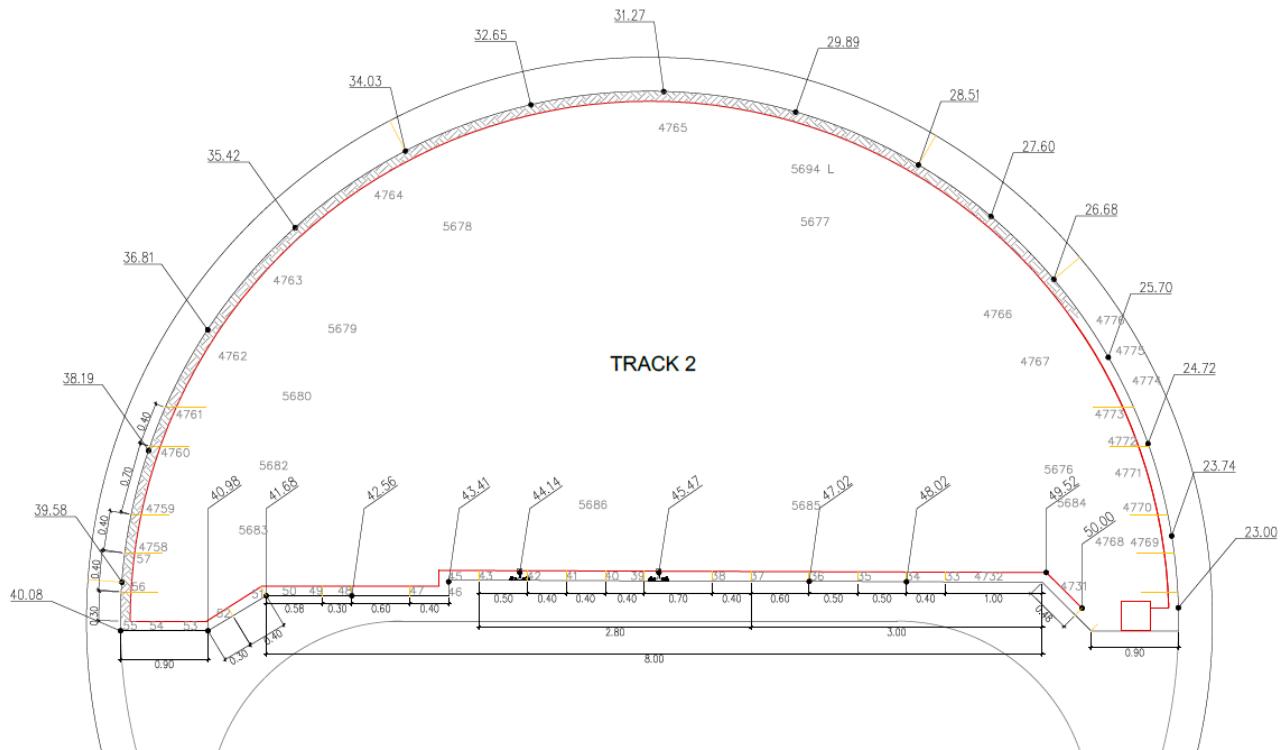


Figura 12. Tramo da seção do túnel e tramificação FOD.

A Tabela 3 a seguir mostra a identificação da Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16 e Figura 17 com o processo de trabalho realizado:

Tabela 3. Identificação de figuras.

Figura	Proceso de obra	Day / Intervalo de dias	Comprimento de FOD
Figura 13	Estado inicial	4 out.	Comprimento total: 50 m
Figura 14	Pré-escavação	7 out.	Comprimento total: 50 m
Figura 15	Escavação	18 out. – 07 nov.	Comprimento total: 50 m
Figura 16	Concretagem da fundação	13 dez.	Comprimento total: 50 m
Figura 17	Evolução temporal	4 out. – 17 mai.	Comprimento total: 50 m

ESTADO INICIAL

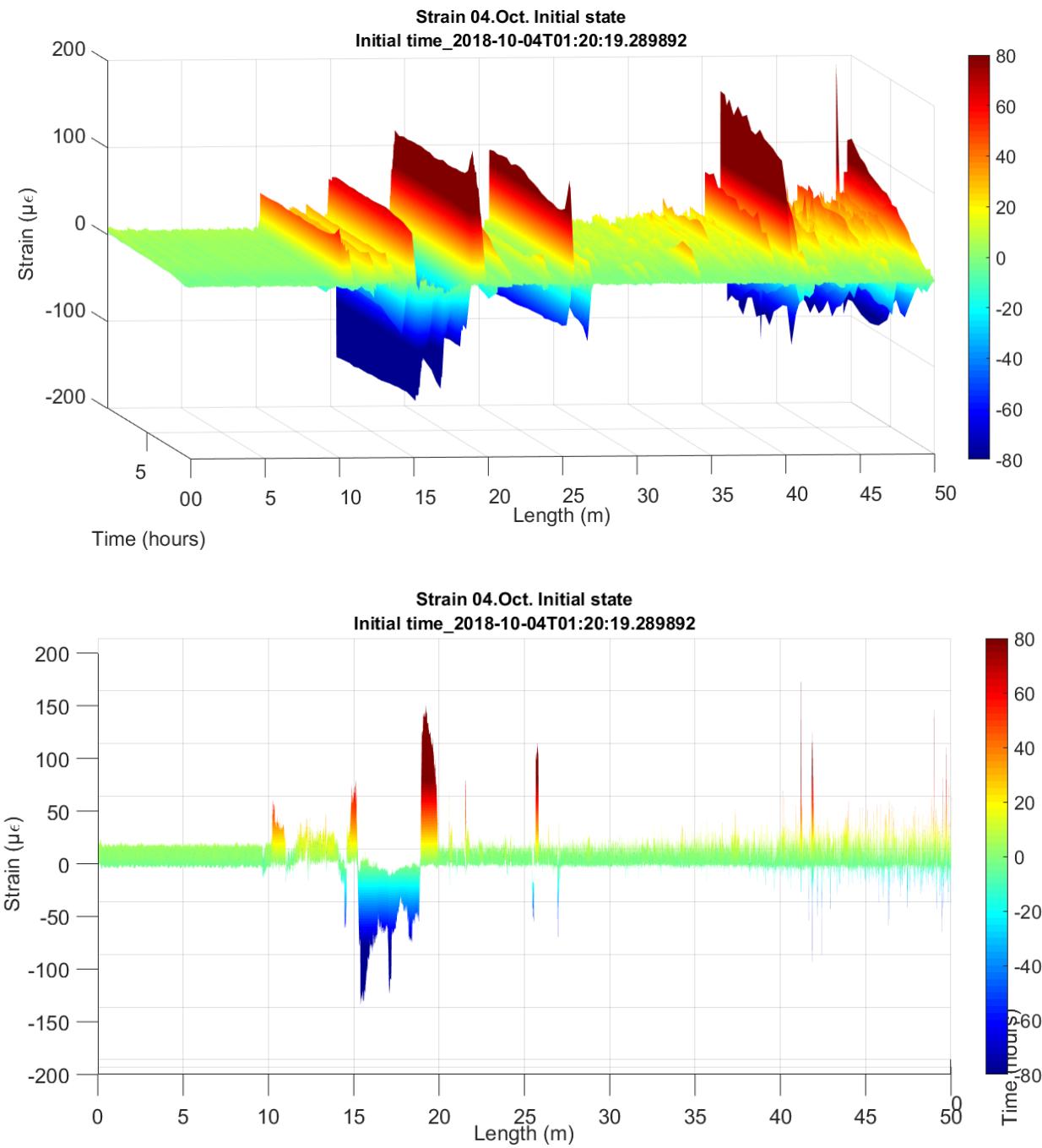


Figura 13. Estado inicial e de calibração. Comprimento 50m do FOD. Visão axonométrica e frontal.

PRÉ-EXCAVAÇÃO

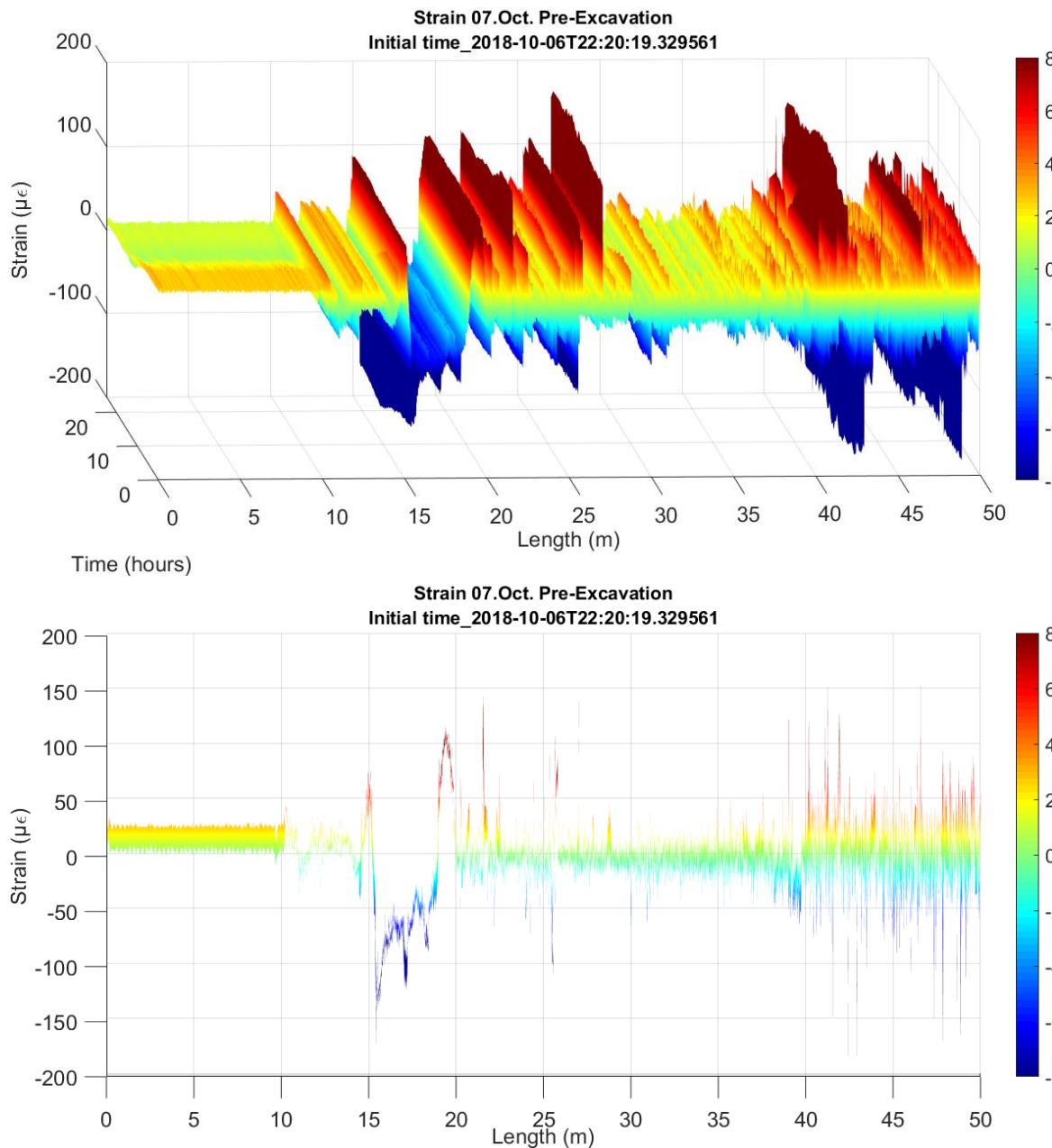


Figura 14. Pré-escavação. Comprimento 50m do FOD. Visão axonométrica e frontal.

ESCAVACÃO

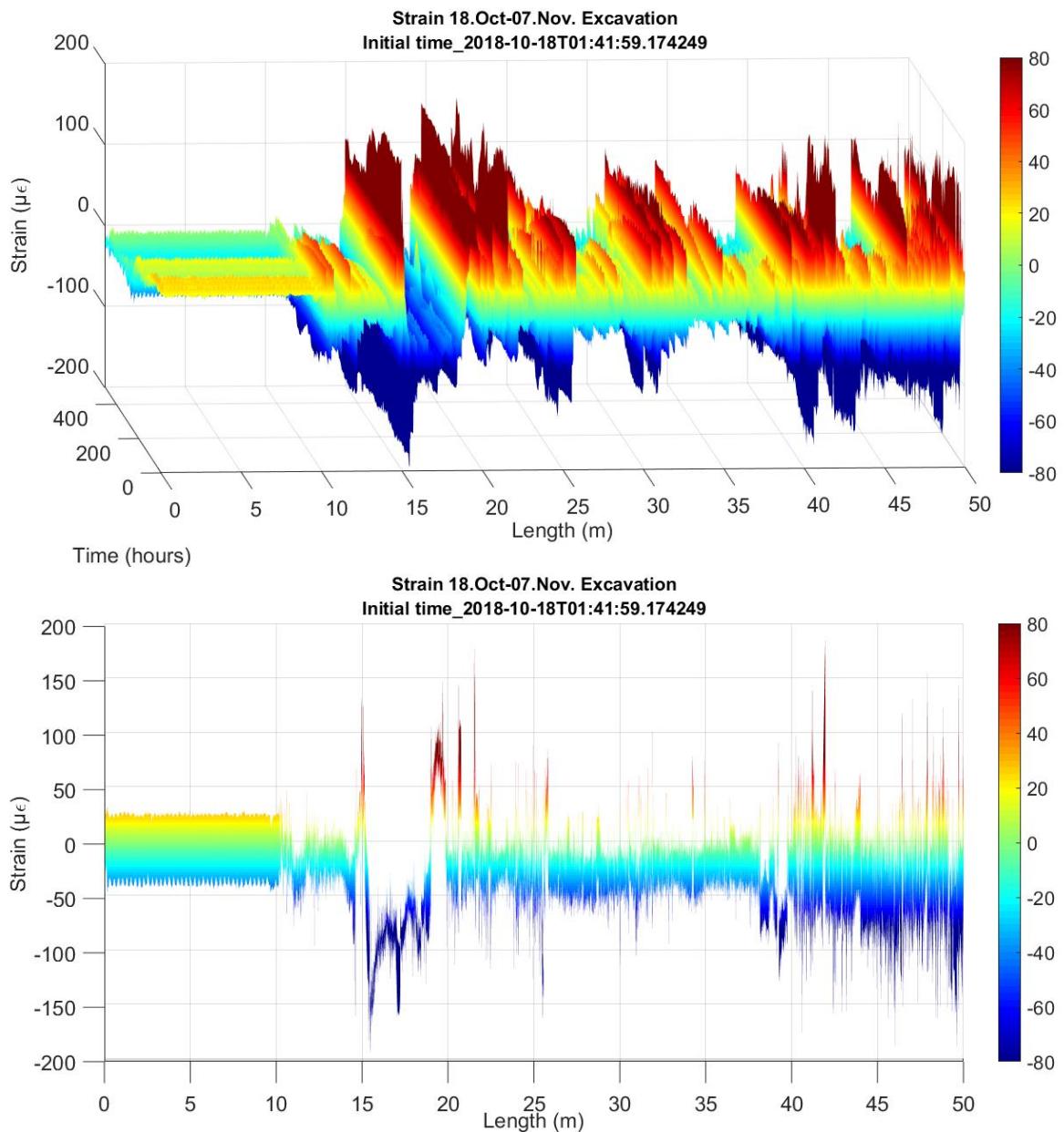


Figura 15. Escavação completa. Comprimento 50m do FOD. Visão axonométrica e frontal.

EXECUÇÃO 1ER TRAMO FUNDACÃO

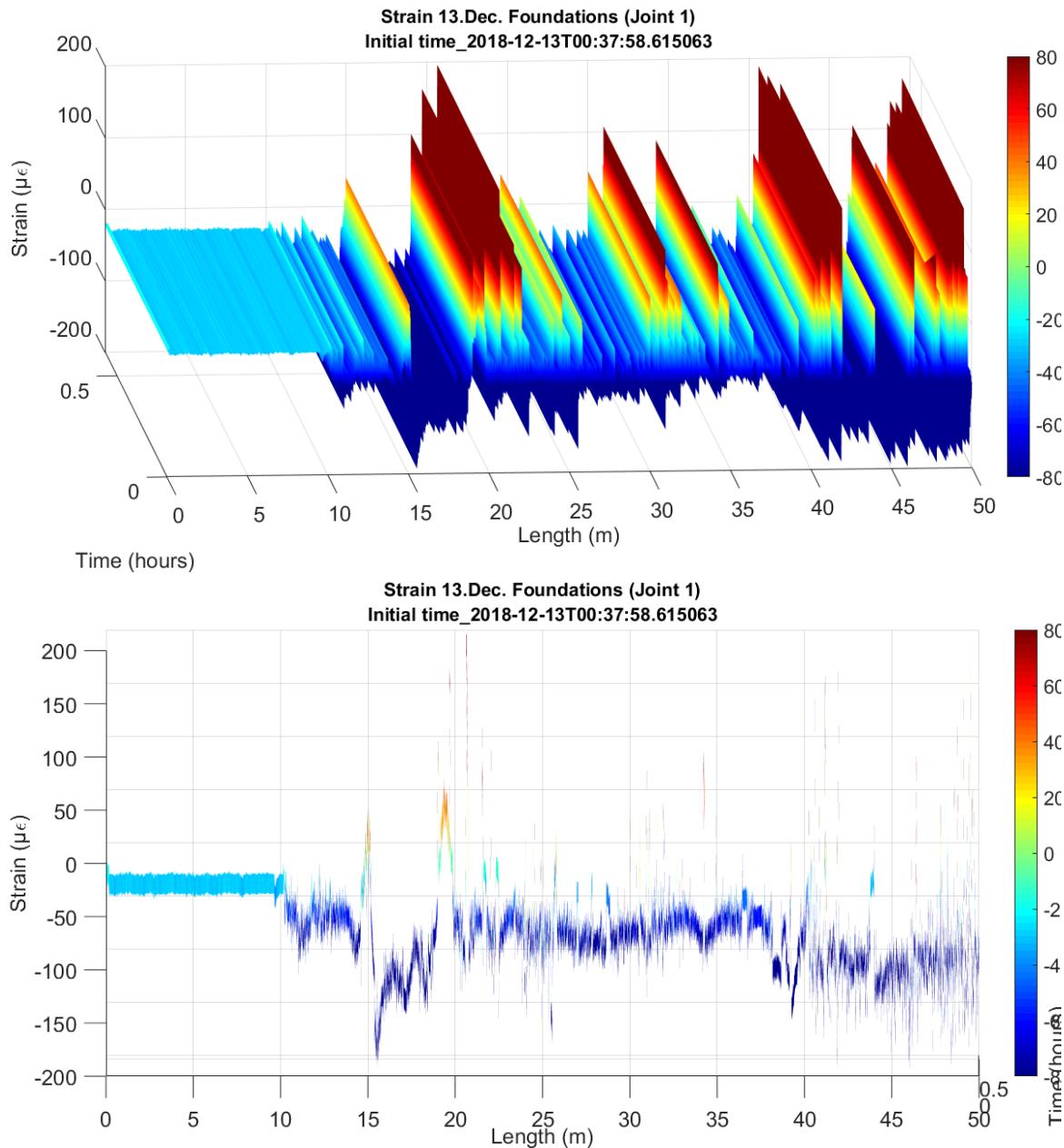


Figura 16. Execução do primeiro trecho da laje de fundação. Comprimento 50m do FOD. Visão axonométrica e frontal.

EVOLUÇÃO TOTAL

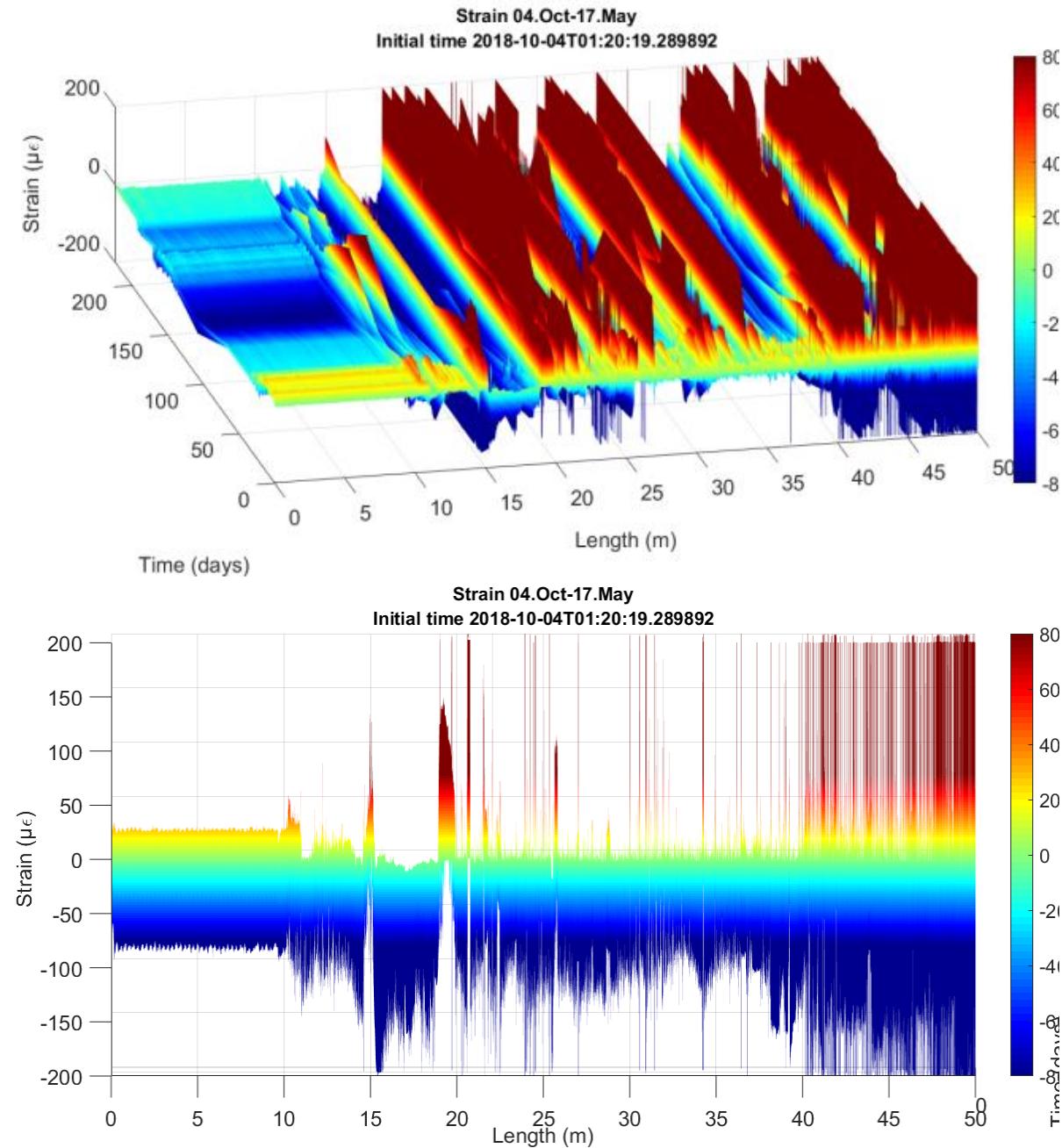


Figura 17. Evolução temporal de 4 de outubro e 17 de maio. Comprimento 50m do FOD. Visão axonométrica e frontal.

Em seguida, na Figura 18 e Figura 19, o registro das leituras em 6 pontos críticos é incorporado ao longo da seção da abóbada do túnel.

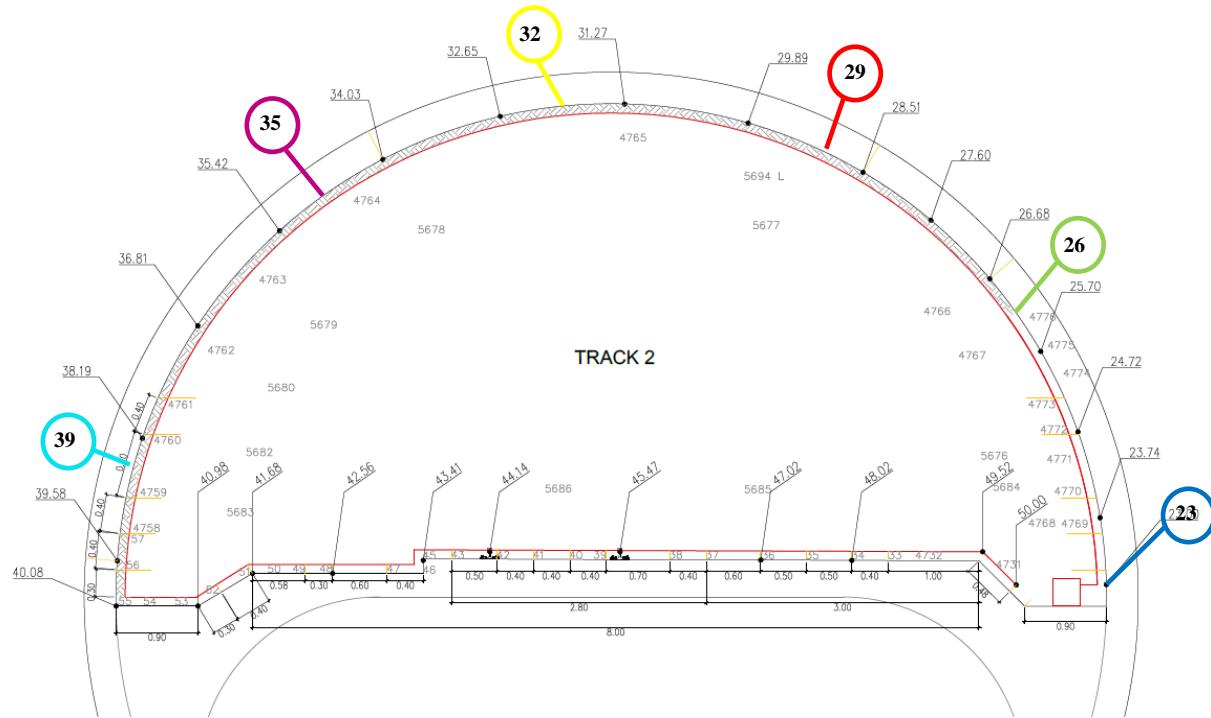


Figura 18. Identificação de pontos de controle críticos na abóbada do túnel.

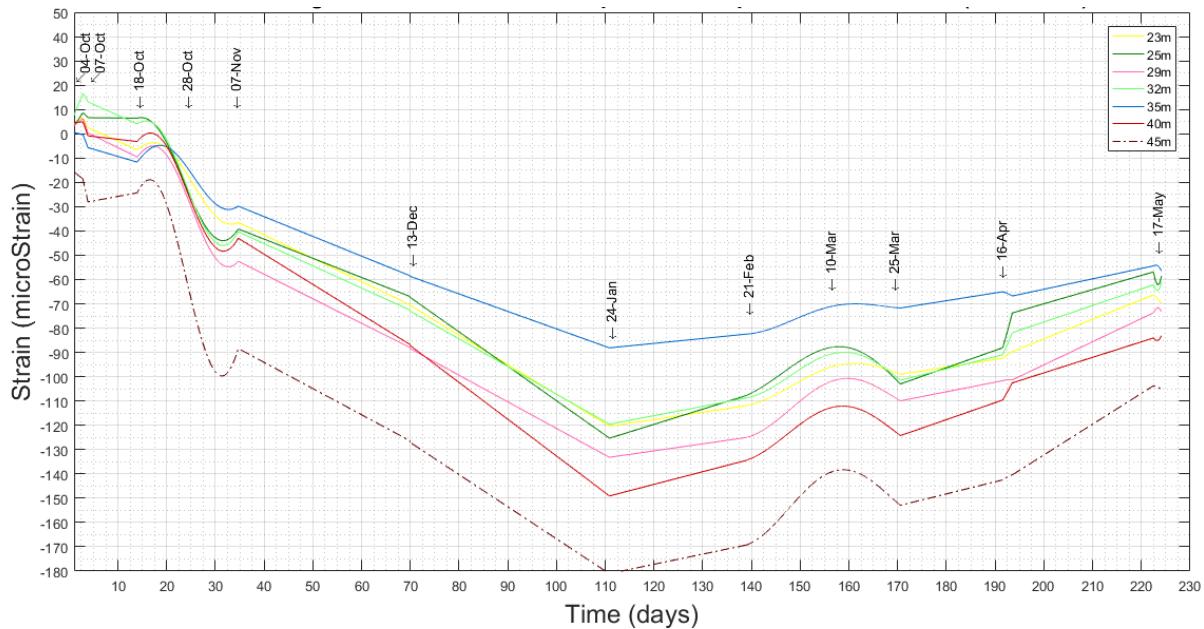


Figura 19. Evolução temporal de 4 de outubro de 2018 a 17 de maio de 2019 em pontos de controle críticos.

Em geral, observa-se que:

- 1) A seção da fibra entre 40 e 50m → corresponde à área da via. Nesta seção é onde há mais excitação da fibra dada a etapa do trilho. A vibração provocada pelo cruzamento da ferrovia faz com que neste trecho haja mais distorção de leituras. Mesmo assim, observa-se como essas variações de microdeformações registradas tendem a aumentar na compressão, o que é coerente no que diz respeito à descompressão e ovalização sofrida pela seção curva do túnel e que faz com que a laje atue como escora à esta ação. A ovalização do túnel é explicada no próximo ponto. Da mesma forma, em nenhum caso os valores obtidos ultrapassarão o limite de advertência estabelecido no Plano de Monitoramento e Contingência.
- 2) A seção da fibra entre 23 e 40m → corresponde à área da abóbada. Nesta seção observa-se como, em geral, houve um aumento das microdeformações de compressão ao longo da instrumentação. Isso se deve à descompressão ocasionada pela escavação e esvaziamento da terra da obra, de forma que esta descompressão produz uma certa “ovalização” do trecho, que se traduz em um aumento da compressão na fibra interna do trecho (a fibra interna da seção é comprimida e a fibra externa da seção é descomprimida). Percebe-se claramente como passa de uma cor verde (nula e deformação inicial) para uma cor azul que indica compressão. Da mesma forma, em nenhum caso os valores obtidos ultrapassarão o limite de advertência estabelecido no Plano de Monitoramento e Contingência.
- 3) Em relação à análise de tensões e a partir da definição do módulo de deformação longitudinal secante E_c do concreto e para um estado de tensão em condições de serviço, ou seja, para um estado ou estágio elástico onde as tensões das fibras de concreto da seção são proporcionais às deformações, entende-se que, mesmo observando esse aumento em $\mu\epsilon$, não induzem tensões excessivas no mesmo.
- 4) A seção de fibra entre 10 e 23m → corresponde à seção de monitoramento longitudinal. Os valores de compressão e tensão são observados nesta área, mas ao longo de sua evolução foram constantes em todos os momentos, ou seja, sem variação no que diz respeito à origem das leituras e calibração. Esse fato indica que nesta seção não houve variações na resposta à estrutura, ou seja, as ações realizadas não ocasionaram alterações de resposta apreciáveis na estrutura.
- 5) A seção de fibra entre 0 e 10m → corresponde à seção de fibra não colada. Nesta área, observa-se uma evolução linear sem alterações diferenciais, onde se verifica que não existem variações substanciais de temperatura que induzam variações significativas de tensão, de forma que não influenciam nas áreas restantes de FOD aderidas.

Da mesma forma, podem ser observados picos e/ou descontinuidades obtidos com o monitoramento, que correspondem às áreas de ligação entre trechos dos segmentos onde a fibra ótica sofre uma desaderência com o concreto, já desde sua implantação na origem. Esses picos permanecem estáveis no que diz respeito à sua localização.

4. CONCLUSÕES

A utilização de sensores de fibra ótica (Optical Backscatter Reflectometer) é uma tecnologia promissora para o monitoramento do estado estrutural, pois permite o monitoramento contínuo no tempo e no espaço da tensão e da temperatura ao longo da fibra.

Será efetuada o monitoramento de um tramo de túnel, o que envolve, até a data, o controle da estrutura em serviço durante os oito meses (outubro 2018 - maio 2019) que abrangem as obras de construção da estrutura de um edifício na via, até o nível do 1º andar, na área de construção acima do túnel.

O monitoramento tem servido para identificar e caracterizar tecnicamente os aumentos das tensões de tração e compressão, em decorrência das diferentes fases da obra, desde antes do início, com as leituras de calibração anteriores até a fase de construção da estrutura, na qual nos encontramos. O monitoramento continuará até o final das obras, previsto para novembro de 2020.

Durante este período de 8 meses, as variações de microdeformação da fibra FOD 1 foram de $153\mu\epsilon$, o que, traduzido em tensões, representa uma variação máxima de tensão de $5,75\text{MPa}$.

Esses valores são aceitáveis para este tipo de estrutura, pois são valores de compressão no concreto. Por outro lado, esses valores incluem efeitos térmicos.

Com base nas variações obtidas no monitoramento da fibra FOD 1 ao longo deste meio ciclo térmico, pode-se considerar que o impacto da ação térmica no túnel foi desprezível

Uma vez confirmado que o túnel está em condições de segurança adequadas e concluída a obra, será disponibilizado um registro permanente para acesso ao trecho, podendo serem feitas leituras intermitentes ao longo de sua vida útil para determinar o comportamento diferido. Isso foi levantado dentro do plano obrigatório de manutenção do túnel.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos técnicos do IMHAB (Institut Municipal del Habitatge i Rehabilitació de Barcelona) e TMB (Transports de Barcelona, S.A.) pelas facilidades disponibilizadas para a gestão de todas as operações.

6. BIBLIOGRAFIA

- 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.