

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/361052371>

Técnicas avanzadas de control de obras: preconvergencia en túneles y barreras dinámicas

Conference Paper · June 2022

CITATIONS

0

READS

15

7 authors, including:



Andrea Segalini

Università di Parma

92 PUBLICATIONS 790 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Roberto Savi

Università di Parma

21 PUBLICATIONS 18 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Edoardo Cavalca

Università di Parma

18 PUBLICATIONS 13 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Alessandro Valletta

Università di Parma

27 PUBLICATIONS 71 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



MUMS development for landslide and underground excavation monitoring [View project](#)



Rock mechanics course slides (in spanish) [View project](#)

XI Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica

La Geotecnia en apoyo
de la seguridad y
el desarrollo sostenible

**7^{as} Jornadas
Hispano-Portuguesas
de Geotecnia**

Desafíos asociados
a la mejora y refuerzo de suelos

**Mieres, Asturias
24-27 de mayo de 2022**



XI Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica

**La geotecnia en apoyo
de la seguridad y el desarrollo sostenible**



7^{as} Jornadas Hispano-Portuguesas de Geotecnia

**Desafíos asociados a la mejora
y refuerzo de suelos**

XI Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica
La geotecnia en apoyo
de la seguridad y el desarrollo sostenible

7^{as} Jornadas Hispano-Portuguesas de Geotecnia
Desafíos asociados a la mejora
y refuerzo de suelos

Mieres, Asturias
24-27 de mayo de 2022



Edición de este libro de actas realizada con el patrocinio de:



Edita y distribuye:

Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica
Laboratorio de Geotecnia – CEDEX. Alfonso XII, 3-5, 28014 Madrid.

Revisión y maquetación:

Carlos Laina Gómez, Ignacio Pérez Rey, Mauro Muñiz Menéndez

Diseño de cubierta:

Chelo Cruz

Imagen de cubierta: Cherry Laithang by Unsplash

ISBN: 978-84-09-40096-6

DEPOSITO LEGAL: AS 00907-2022

Prohibida su reproducción total o parcial, por cualquier medio o técnica, sin la expresa autorización escrita de los autores.

Impreso en España – Printed in Spain

COMITÉ ORGANIZADOR

Fernando Pardo de Santayana Carrillo
(Presidente)
Presidente de la SEMSIG, CEDEX

Herminia Cano (Secretaria)
Secretaria General de la SEMSIG, MITMA

Ángel Leiro López
IGS-España

Antonio Bernardo Sánchez
U. León

Asunción Cámara Obregón
U. Oviedo, EPM

Carlos Laina Gómez
CEDEX

Claudio Olalla Marañón
SEMSIG, UPM

Ignacio Pérez Rey
SEMR, CEDEX

Javier González-Gallego Rodríguez-Barbero
SEMR, CEDEX

José Estaire Gepp
SEMSIG, CEDEX

José Luis Arcos Álvarez
SEMSIG, AETESS

José Luis Viesca Rodríguez
U. Oviedo, EPM

Leandro Alejano Monge
Presidente de la SEMR, U. Vigo

Luis Sañudo Fontaneda
U. Oviedo, EPM

Mauro Muñiz Menéndez
SEMR, CEDEX

Miguel Ángel Rodríguez
U. Oviedo, EPM

Pedro Sola Casado
AETOS

Pilar Rodríguez Monteverde
SEMSIG, UPM

COMITÉ CIENTÍFICO

César Sagasetta Millán (Presidente)
SEMSIG, U. Cantabria

Angel Leiro López
IGS-España

Carlos Laina Gómez
CEDEX

Claudio Olalla Marañón
SEMSIG, UPM

Enrique Dapena García
SEMSIG

Gustavo Armijo Palacio
SEMSIG, AETESS

Ignacio Pérez Rey
SEMR, CEDEX

José Estaire Gepp
SEMSIG, CEDEX

José María Echave Rasines
SEMSIG, AETESS

Leandro R. Alejano Monge
Presidente SEMR, U. Vigo

Mauro Muñiz Menéndez
SEMR, CEDEX

Pedro Sola Casado
AETOS

**COMITÉ ORGANIZADOR DE LAS 7^{as}
HISPANO-PORTUGUESAS DE
GEOTECNIA**

Fernando Pardo de Santayana Carrillo
(Presidente)

Presidente de la SEMSIG

Alexandre Pinto (Vicepresidente)

Presidente da SPG

António Alves Cristóvão

SPG

Javier González-Gallego Rodríguez-Barbero

SEMSIG

Nuno Cristelo

SPG

Svetlana Melentijevic

SEMSIG

COMITÉ CIENTÍFICO

Antonio Gens Solé (Presidente)

SEMSIG

António Viana da Fonseca

SPG

Goran Vukotic

SEMSIG

João Marcelino

SPG

Mauro Muñiz Menéndez

SEMSIG

1.38 <i>Ensayo de permeabilidad in situ en un material todo-uno alterado y mal graduado.</i> Diego Escudero Merino, Carlos Laina Gómez, Juan Antonio Diez Torres, Enrique Asanza Izquierdo, Enrique Moreno Calle, Rubén Castilla Amate	407
1.39 <i>Análisis por método de elementos finitos, de la pérdida de capacidad de un pilote de camisa metálica, hincado para estructura offshore, según la proximidad de su punta a una capa blanda.</i> Rafael Salado Sáez, Miguel A. Díaz Aguado, José R. Ladrón de Guevara	415

SESIÓN 2. LA MECÁNICA DE ROCAS Y LA SEGURIDAD DE LAS

OBRAS PONECIAS

Adrián Riquelme Guill <i>Aplicación de las técnicas de adquisición remota al estudio de familias de discontinuidades planas en taludes rocosos</i>	423
Celestino González Nicieza <i>Inyecciones en el terreno. ¿Dónde está el límite?</i>	433

COMUNICACIONES

2.01 <i>Capacidad portante de cimentaciones superficiales en rocas volcánicas de baja densidad utilizando el método de optimización DLO.</i> Rubén A. Galindo Aires, Miguel Ángel Millán Muñoz	453
2.02 <i>Estudio de la profundidad de rotura de taludes indefinidos en macizos rocosos.</i> Noelia Esteban Rivera, Rubén A. Galindo Aires	459
2.03 <i>Caracterización geomecánica de pizarra mediante ensayos de laboratorio.</i> Manuel A. González Fernández, Xian Estévez Ventosa, Leandro R. Alejano, Nubia A. González Molano, José Alvarellós, Jordi Delgado	467
2.04 <i>Empleo de la fotogrametría terrestre para el diseño de las medidas de estabilización de un macizo rocoso.</i> Alberto Fernández Eusebio, Javier Moreno Robles, Mauro Muñoz-Menéndez	475
2.05 <i>Estudio experimental de la resistencia y dureza superficial de una roca caliza expuesta a elevadas temperaturas.</i> María Elvira Garrido de la Torre, Víctor Ibáñez Martínez, Ferry Blondo Petnga Doukam, Carlos Hidalgo Signes, José Bernardo Serón Gáñez, Roberto Tomás Jover	483
2.06 <i>Técnicas avanzadas de control de obras: preconvergencia en túneles y barreras dinámicas.</i> Andrea Segalini, Roberto Savi, Edoardo Cavalca, Alessandro Valletta, Ignacio Pérez-Rey, Mauro Muñoz-Menéndez, Leandro R. Alejano	491
2.07 <i>Red neuronal para el cálculo de la capacidad portante de cimentaciones superficiales sobre roca.</i> Miguel Ángel Millán Muñoz, Rubén Galindo Aires, Ana Teresa Santos de Alencar	499
2.08 <i>Carga de hundimiento por punta para pilotes en roca mediante el método de análisis límite Discontinuity Layout Optimization.</i> Alberto Picardo Pérez, Miguel Á. Millán Muñoz, Rubén Galindo Aires, Ana T. Santos de Alencar	505
2.09 <i>Resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca: estado del arte.</i> José Gregorio Gutiérrez-Chacón, Salvador Senent, Svetlana Melentijevic, Rafael Jiménez	513

2.10	<i>Fiabilidad frente al hundimiento de cimentaciones superficiales en piroclastos tipo Lapilli.</i> Carlos L. Garrido, Rubén Á. Galindo y Alcibiades Serrano	521
2.11	<i>Análisis de la fractura de rocas con entallas a diferentes temperaturas usando la distancia crítica.</i> Jon Justo, Jorge Castro, César Sagaseta	529
2.12	<i>Análise probabilística da estabilidade de uma cunha rochosa considerando a variabilidade espacial.</i> Renato Pereira, Luís Lamas, José Muralha	537
2.13	<i>Utilidad de los métodos empíricos en la estimación del riesgo por desprendimientos tras un incendio forestal.</i> Ignacio Pérez-Rey, Mauro Muñoz-Menéndez, Javier González, Adrián Riquelme, Roberto Tomás, Leandro R. Alejano	545
2.14	<i>Una mirada crítica a la aplicación de las clasificaciones geomecánicas Rock Mass Rating (RMR) y Slope Mass Rating (SMR).</i> Miguel Cano, Roberto Tomás, José Luis Pastor, Adrián Riquelme, Álvaro Rabat, Luis Jordá, José B. Serón	553
2.15	<i>Descripción y comportamiento de las inyecciones de fracturación y drenaje profundo con pozos de gran diámetro, para estabilizar la CN-630 en el puerto de Pajares en Asturias.</i> César Fernández-Nespral Pérez, Pedro R. Sola Casado	561

TOMO II

SESIÓN 3. LA GEOTECNIA Y LA SOSTENIBILIDAD

PONENCIAS

María Lorenzo Conto	<i>Aprovechamiento energético del calor del agua de mina mediante geotermia</i>	571
María Santana Ruiz de Arbulo	<i>El uso de residuos en la construcción de terraplenes y su caracterización medioambiental</i>	577

COMUNICACIONES

3.01	<i>Un nuevo tipo de pilote: el Pilote Hincado de Hormigón Reinyectado por el Fuste (PHHRF).</i> Pablo Ruiz-Terán, César Sagaseta Millán, José Luis Arcos Álvarez, Carlos Cano Barreiro, Rafael Gil Lablanca	601
3.02	<i>Pruebas de carga de pilotes. Métodos, precisión y contrastes.</i> Carlos Fernández Tadeo	609
3.03	<i>Experiencias en la Estabilización de Suelos con Cal y Cemento en la Segunda Circunvalación de Granada.</i> Eloy Jiménez Ontiveros, Francisco Javier Villoldo Salvador	617
3.04	<i>Desarrollo de un modelo reducido de análisis de suelos usando Digital Image Correlation (DIC).</i> Álvaro Twose Velasco, Miguel Ángel Millán Muñoz, M ^a del Pilar Rodríguez-Monteverde Cantarel	625

Técnicas avanzadas de control de obras: preconvergencia en túneles y barreras dinámicas

Andrea Segalini, Roberto Savi, Edoardo Cavalca, Alessandro Valletta
Departamento de Ingeniería y Arquitectura – Università di Parma, Italia

Ignacio Pérez-Rey, Mauro Muñoz-Menéndez
Laboratorio de Geotecnia – CEDEX

Leandro R. Alejano
CINTECX, Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente – Universidad de Vigo

RESUMEN: Los diseños geotécnicos se basan en hipótesis y aproximaciones no siempre fiables, por lo que las incertidumbres del comportamiento de estructuras geotécnicas suelen ser mayores que las que se dan en otras estructuras de ingeniería. Así, las observaciones *in situ* y, en particular, la medición de magnitudes físicas específicas son el mejor antídoto para superar las limitaciones propias de estas obras. En este contexto, el control o monitorización geotécnica se revela como una herramienta básica para el diseño y ejecución de obras en condiciones de seguridad y economía aceptables. En este estudio se presenta la aplicación de sistemas de monitorización de obras basados en sensores tipo MEMS (*Micro Electro Mechanical System*), de precio asequible y razonablemente precisos, que permiten tomar medidas múltiples con aportes de energía mínimos y pueden transmitir gran cantidad de información en tiempo real. En particular, se presentan dos prototipos de sistemas de control basados en estos sensores. El primero de ellos mide la pre-convergencia en túneles, permitiendo obtener los desplazamientos del terreno en un sondeo situado a la altura del techo de excavación y por delante del frente de la misma, lo que contribuye a identificar en fase temprana posibles problemas de la excavación y correlacionar las medidas con cálculos previos. El segundo monitoriza la respuesta de barreras flexibles para el control de desprendimientos, controlando la inclinación de postes y la elongación de la malla, por lo que permite conocer en tiempo real la situación de la barrera sin acceder a la misma.

PALABRAS CLAVE: Monitorización, control de obras, túneles, barreras dinámicas, seguridad.

1 INTRODUCCIÓN

La instrumentación de campo implementada en sistemas de monitorización o vigilancia es vital para la práctica geotécnica (Dunichiff, 1988). Los ingenieros geotécnicos deben tener un conocimiento sólido de la instrumentación ya que, para ellos, es una herramienta de trabajo esencial. La segunda mitad del siglo pasado fue testigo de importantes avances en el desarrollo e implementación de instrumentos geotécnicos. Durante los últimos 30 años se ha producido un giro importante hacia los instrumentos electrónicos, algunos de ellos cada vez más complejos y eficientes. Aunque originalmente menos fiables que la instrumentación óptica y mecánica, los dispositivos

electrónicos han mejorado significativamente en términos de fiabilidad y robustez y se están convirtiendo en la instrumentación estándar y más requerida. Esto se debe no solo a la mejora de su fiabilidad sino también a los requisitos actuales de automatización en la recogida y análisis de datos geotécnicos. Las estructuras críticas expuestas al riesgo de deslizamientos de tierra, como presas, canteras, carreteras, etc., necesitan sistemas de alerta temprana o de monitorización en tiempo casi real, que deben proporcionar una advertencia inmediata cuando se alcanzan ciertos umbrales. Esto permite la pronta activación de todos los procedimientos de emergencia requeridos (Segalini *et al.*, 2017).

2 TIPOS DE MONITORIZACIÓN

La primera condición que debe considerar el diseñador es la tipología de la monitorización requerida. La elección de las magnitudes físicas a medir, la tipología de instrumentos y sus localizaciones y la estructura de recopilación de datos son muy diferentes dependiendo de los objetivos de seguimiento. Se comentan en los siguientes párrafos los casos de monitorización más típicos con consideraciones básicas relativas.

2.1 Seguimiento de fenómenos naturales

La definición de vigilancia de fenómenos naturales se refiere a todos los controles geotécnicos que requieran investigar el comportamiento tenso-deformacional de materiales naturales o de construcción (como por ejemplo suelos reforzados, presas, etc.) cuando estén sometidos a potenciales modificaciones de las condiciones de contorno (presión del agua, variación de temperatura, niveles de agua en ríos, canales o freáticos). En el caso del seguimiento de elementos naturales como deslizamientos de tierra, la elección del sistema de control debe partir de hipótesis relacionadas con las características litológicas y estratigráficas del área de estudio y la tipología del fenómeno de inestabilidad esperado.

Además, el objetivo del seguimiento merece algunas consideraciones: si el objetivo es estudiar y controlar la evolución del fenómeno, la adquisición de datos podría ser manual, sin necesidad de una comprobación inmediata de la salida medida. Sin embargo, si la finalidad es generar una alerta, sería necesario recolectar medidas automatizadas, las cuales tienen que ser procesadas y evaluadas en muy poco tiempo (casi en tiempo real) con la posibilidad de contactar rápidamente al responsable del seguimiento si se supera el umbral definido. Para ello, la definición de umbrales es importante y debe ser el resultado de un modelo preliminar del potencial fenómeno a evitar, siempre sujeto a incertidumbre. En el control de deslizamientos también es fundamental medir presiones de agua, temperaturas, precipitaciones, niveles hidrográficos adyacentes a la zona y, en su caso, niveles de carga de los elementos de sostenimiento.

Durante la planificación del sistema, una vez aclaradas las preguntas a responder, es necesario decidir las entidades físicas a medir, definir las posiciones donde deben ser monitoreadas y seleccionar los instrumentos más adecuados para lograr el mejor compromiso entre la relevancia de los resultados a obtener y el coste de la operación.

2.2 Seguimiento de estructuras geotécnicas superficiales

Nos referimos aquí a estructuras que tienen una fuerte interacción con los suelos o rocas a poca profundidad, como por ejemplo muros de contención, muros diafragma, cimentaciones superficiales o profundas, pilotes, pozos, etc.

El objetivo aquí es el control de la correspondencia entre las hipótesis de diseño y la respuesta de las estructuras durante las obras. Debería por tanto ser más fácil seleccionar adecuadamente las posiciones y variables a medir y su magnitud esperada. En este sentido, convendría que los proyectistas sugieran los puntos ideales de medida y los valores de magnitud esperados o, al menos, el rango de variabilidad aceptable, lo que permitiría la correcta aplicación del método observacional (Peck, 1969). De esta manera, el diseñador del sistema de control podría identificar la solución tecnológica que mejor se adapta a la obra en cuestión. También pueden definir los umbrales de aviso para activar un procedimiento de alerta temprana.

2.3 Seguimiento de estructuras geotécnicas subterráneas

Nos referimos aquí a estructuras subterráneas con interacciones con suelos y rocas, típicamente túneles subterráneos más o menos profundos, minas, depósitos subterráneos, etc.

En estas aplicaciones, la monitorización tiene la misma finalidad que en el caso anterior, con la peculiaridad que se debe controlar el comportamiento de los materiales a cierta distancia de la excavación. Esta necesidad suele estar ligada a la verificación de las hipótesis de diseño sobre el comportamiento mecánico e hidráulico del geomaterial alrededor de la excavación, que en este caso es el elemento relevante (Lunardi, 2000).

En este seguimiento específico, los requisitos descritos en el apartado anterior se combinan con

algunos de los relacionados con el seguimiento de los fenómenos naturales. La activación del sistema de monitoreo en el contorno de la estructura debe realizarse antes del comienzo de las obras. Esto es fundamental para definir el comportamiento de la zona, que será modificado durante su construcción. En muchos casos, puede ser necesario monitorizar las estructuras existentes que podrían dañarse o modificarse durante el trabajo de construcción. Dicha vigilancia también tendrá la finalidad de demostrar, en su caso, si se producen daños a la propiedad en el entorno de la obra. En esta categoría de vigilancia se pueden introducir medidas adicionales, como la vigilancia acústica y de vibraciones durante la excavación, y el control ambiental dentro de las cavidades subterráneas para garantizar el mantenimiento de un ambiente saludable para los trabajadores.

3 SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE LA PRE-CONVERGENCIA EN TÚNELES

De acuerdo con varias filosofías de diseño y ejecución de túneles como el Nuevo Método Austriaco (Müller y Fecker, 1978), *Design as you go* (Fairhurst, 1999) o ADECO-RS (Lunardi, 2000); el control del movimiento del terreno de la zona delantera del frente del túnel ayuda a definir el mejor sistema de sostenimiento y el método y extensión de los avances, reduciendo finalmente el tiempo y los costos de realización de la infraestructura. La respuesta del núcleo de roca del frente de avance del túnel es fundamental para comprender el comportamiento mecánico del macizo rocoso (Figura 1.a).

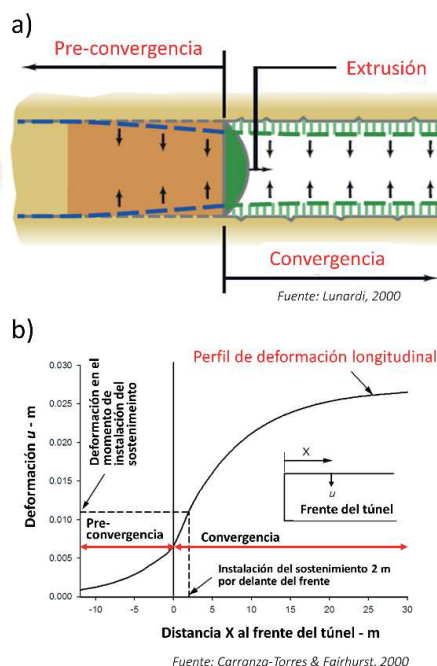


Figura 1. a) Conceptos de pre-convergencia, convergencia y extrusión en túneles (Lunardi, 2000). b) Típico perfil longitudinal del terreno en un túnel (Carranza Torres y Fairhurst, 2000).

El Método de Convergencia-Confinamiento define el estado de tensión y deformación mediante el estudio de tres componentes básicos: el Perfil de Desplazamiento Longitudinal (LDP) (Figura 1.b), la Curva Característica del sostenimiento (SCC) y la Curva característica del terreno (GRC) (Panet, 1995, Carranza Torres y Fairhurst, 2000, Alejano *et al.*, 2012).

Hasta la fecha, apenas se realizan medidas de convergencia por delante del frente (pre-convergencia) durante la construcción de túneles. Generalmente, se miden convergencias en la zona excavada y a varias distancias del frente. Los instrumentos de medida tradicionales no pueden adquirir datos durante el paso por el frente del túnel, de forma que, en túneles en circunstancias difíciles, la pre-convergencia se define indirectamente mediante medidas de extrusión.

3.1 La herramienta Pre-Conv Array

Este sistema fue desarrollado por Cavalca (2020). Para medir pre-convergencia se propone el sistema de monitoreo Pre-Conv Array, que consiste en una cadena de sensores de resina sintética, llamados Pre-Conv Links, ubicados a distancias predefinidas e instalados en un sondeo horizontal realizado desde la corona de un túnel y en la dirección de avance. Cada enlace está equipado con un acelerómetro MEMS 3D y un sensor de temperatura. Los sensores están conectados por un cable cuadripolar y una varilla de fibra de vidrio para preservar la alineación correcta (Figura 2).

El sistema mide los asentamientos diferenciales del terreno durante la excavación del túnel. Los datos se transmiten primero a una unidad de control, de donde se transfieren a un servidor remoto donde los datos se almacenan, elaboran y finalmente se cargan en una plataforma web. El sistema no necesita gran cantidad de energía.

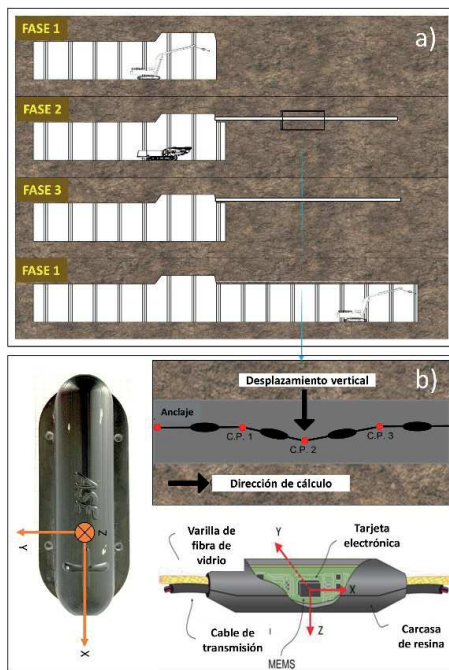


Figura 2. A) Disposición del sistema Pre-Conv Array en un sondeo por delante del frente del túnel y b) esquema de los sistemas de medida.

Pre-Conv Array permite adquirir datos con alta frecuencia de muestreo tanto durante la perforación del túnel como dentro de la operatividad del túnel, brindando información adicional sobre las deformaciones de convergencia que podrían afectar el revestimiento preliminar o definitivo del túnel. Además, una alta frecuencia de muestreo permite implementar un enfoque estadístico, para aplicar el control de datos de autocomprobación para identificar picos de ruido, mediciones incorrectas, fallas y, en general, todos los factores externos que pueden afectar la elaboración de datos.

3.2 Calibración

Los acelerómetros de los sensores tipo MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) se calibran a través de una cámara térmica, que lee cada sensor en 24 posiciones para 10 temperaturas diferentes. Los parámetros de calibración se estiman aplicando una regresión lineal. La norma de los tres ejes instrumentales debe proporcionar el valor de la gravedad.

La calibración de los termómetros se realiza dentro de la cámara térmica junto con los acelerómetros. La calibración define la ganancia y la intersección que se aplicarán para convertir los datos brutos en valores térmicos mediante un proceso de regresión lineal.

Para constatar la validez de la calibración se realizó adicionalmente una correlación con un levantamiento topográfico en una prueba realizada en laboratorio (Figura 3.a) moviendo las localizaciones de los puntos de medida. La prueba se realizó utilizando 6 puntos de medida Pre-Conv con separaciones de 1 metro ancladas a varillas metálicas. Las varillas metálicas se fijaron a la pared y se aplicaron desplazamientos verticales predefinidos. Además, se colocaron blancos topográficos en las posiciones de cada sensor para medir, y finalmente comparar las deformaciones impuestas, observándose un buen ajuste (Figura 3.b). Los valores de pre-convergencia se derivaron de un experimento a gran escala realizado por Lunardi (2000) donde los desplazamientos de pre-convergencia se definieron colocando extensómetros de varilla multi-punto sobre la corona del túnel durante el avance de la excavación, y mediante extensómetro horizontal para 2-3 diámetros de túnel.

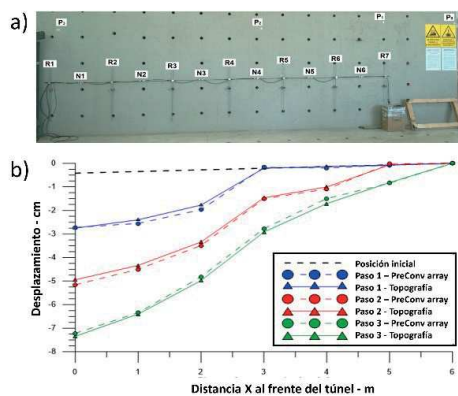


Figura 3. Calibración del sistema Pre-Conv Array a) Pared de medida y b) Resultados de la calibración.

3.3 Ejemplo de aplicación

El primer Pre-Conv Array se instaló en un túnel profundo ubicado en el norte de Italia que conecta dos valles importantes. La herramienta se instaló en un túnel en excavación en materiales de mala calidad geotécnica con una profundidad media de 50 m.

La Figura 4 muestran la comparación entre el perfil de desplazamiento longitudinal evaluado para varios puntos de la excavación en función de la caracterización del macizo en comparación con las deformaciones medidas. Algunos puntos de cálculo, por ejemplo, Pre-Conv Link 2 muestran desplazamientos varios diámetros por detrás del frente. En algunos casos los perfiles recuperados se acercan más a una respuesta elástica (Pre-Cov Link 1 y 2) mientras en otro se ajustan mejor a modelos donde se produce cierta plastificación en el entorno de la excavación (Pre-Conv Link 13 y 14) (véase Figura 4). Los perfiles de deformación longitudinal propuestos por Panet (1995) para materiales elásticos y por Hoek (1999) como ajuste de valores medios medidos en la práctica están definidas para un túnel sin revestimiento, pero los datos de monitoreo presentados son referidos a una cavidad soportada. Además, estas representaciones podrían ser útiles para verificar la eficacia del sostenimiento, que sería tanto mejor en la medida que se alcance el desplazamiento final relativamente cerca del frente (Pre-Conv Link 2).

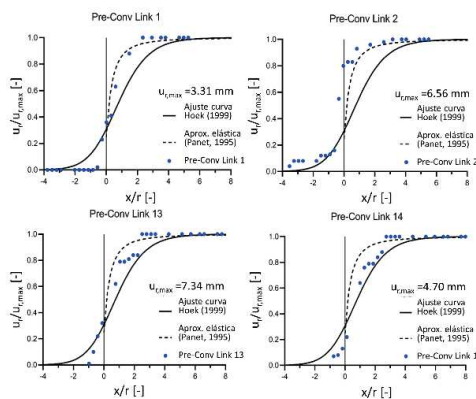


Figura 4. Perfiles longitudinales teóricos según Panet (1995) y Hoek (1999) y medidas con el sistema Pre-Conv Array en un túnel en construcción en Italia.

Pre-Conv Array es capaz de proporcionar los desplazamientos para cada fase de la ejecución de los trabajos de excavación. Permite adquirir datos con alta frecuencia de muestreo, lo que podría ayudar a tomar decisiones y modificar el proyecto en línea con la filosofía “*design as you go*” (Fairhurst, 1999). Pre-Conv Array proporciona además información adicional sobre las deformaciones de convergencia que podrían afectar al revestimiento preliminar o definitivo del túnel; su instalación es relativamente simple y apenas interfiere con las fases de trabajo.

Para un mejor ajuste se puede acudir, para túneles someros, a métodos numéricos como RS2 o RS3 (Rocscience, 2021) o a desarrollos recientes que tienen en cuenta la plasticidad para túneles profundos (Vlachopoulos y Diederichs, 2009; Alejano *et al.*, 2012).

4 SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE BARRERAS DE DESPRENDIMIENTOS

En ocasiones, la estabilización de taludes mediante intervenciones directas es técnica o económicamente inviable. Por ello, se ha desarrollado una tecnología de protección de barreras flexibles para evitar la caída de rocas (Geobrugg, 2021; Paramassi, 2021), que permiten mejorar las condiciones de seguridad en zonas situadas bajo taludes

que puedan generar desprendimientos (Pérez-Rey *et al.*, 2019). Las principales características de las barreras flexibles incluyen fácil instalación, alta deformabilidad y capacidad para disipar energía y alta permeabilidad al agua.

Estas barreras están basadas en disipadores de energía de forma que una vez que son impactadas y detienen algún bloque, pierden su efectividad. Adicionalmente, muy a menudo estas barreras están situadas en zonas de montaña o taludes de gran pendiente de difícil acceso, por lo que resulta complicado saber si siguen operativas.

La eficiencia de estas barreras solo se puede garantizar mediante actividades de mantenimiento constante. Tras un evento de desprendimientos y para recuperar la capacidad estructural es necesario retirar las rocas y escombros depositados en la red; sustituir el sistema de disipación de energía y otros elementos dañados (red, zapatas, etc.).

4.1 Monitorización de barreras flexibles (RSN)

Este sistema denominado *Rockfall Safety Network* (RSN) fue desarrollado por Savi (2020), con la idea dotar a estructuras pasivas flexibles de un sistema de seguimiento que les permitiera ser controladas en el tiempo.

Las características que se buscaron incluían la posibilidad de identificar impactos en estructuras, utilizar las mismas barreras para situar elementos de control, identificar las áreas más activas y proporcionar sistemas de alerta temprana. Adicionalmente, y en línea con otros sistemas de seguimiento, se requería el almacenamiento y la transmisión automática de datos, la elaboración y procesamiento automático de datos, la representación de resultados en una plataforma dinámica *ad hoc* y un bajo consumo energético.

Para identificar los parámetros a controlar en la barrera, se analizaron algunos resultados de pruebas de certificación. Se identificaron como los dos parámetros más relevantes indicativos de mal funcionamiento del sistema, la inclinación de los postes y el alargamiento de la malla. Además, la carga en los cables sensores de los paños de malla, se identificó como otro dato indicativo.

Una vez seleccionados los parámetros a monitorear, se llevó a cabo una investigación para identificar los sensores o dispositivos más adecuados para ser utilizados. Las rotaciones se pueden medir utilizando dos sensores: MEMS o celdas electrolíticas. El uso de un sensor doble posibilita recolectar datos redundantes permitiendo filtrar posibles falsas alarmas. En cambio, la carga en las cuerdas se monitorea usando una celda de carga de tracción. A través de estos tres sensores es posible realizar un seguimiento casi en tiempo real con una frecuencia de medida de un día.

Para identificar de inmediato un posible impacto en la estructura, se ha implementado un dispositivo adicional, consistente en un sensor de disparo conectado a un cable de acero instalado a lo largo de la red que, en caso de impacto, se coloca en tracción y cierra un circuito que genera el envío de un impulso al *datalogger* y la lectura extraordinaria de todos los sensores restantes. A través de este dispositivo el sistema es capaz de realizar un seguimiento en tiempo real (Figura 5).



Figura 5. Medidas del sistema RSN.



Figura 6. Gestión de datos del sistema RSN.

Los sensores MEMS y las celdas electrolíticas se colocan dentro de cajas llamadas módulos BPM instalados en los postes. La celda de carga está conectada a los módulos BPM mediante un cable externo. Los módulos BPM transmiten datos a un registro de datos a través de una red de radio SMART MESH. El registro de datos guarda los datos RAW localmente en una tarjeta SD y luego los envía al centro de cálculo a través de una red UMTS. En el centro informático, los datos se guardan en una base de datos *MySQL* y se procesan mediante un software automático. Luego, los resultados se representan en una plataforma basada en web (Figura 6).

Se desarrolló además un sistema de gestión de alertas, que no se basa sólo en las activaciones de los disparadores sino también en los datos registrados por varios sensores. El sistema de alerta proporciona 5 niveles de alarma a los que corresponden diferentes procedimientos de alerta. En los primeros 3 niveles, solo se envía un correo electrónico a los desarrolladores del sistema con fines de investigación. En los dos últimos niveles también está la alerta de los responsables del seguimiento. El alcance de un nivel se produce cuando se superan umbrales predeterminados.

4.2 Ejemplo de prueba

Para probar el sistema se identificó un sitio piloto en Vobarno en la provincia de Brescia, Italia. El sitio se caracteriza por la presencia de un talud rocoso muy fracturado que a lo largo de los años ha generado varios fenómenos de desprendimiento. En particular, el 6 de febrero de 2016, 750 m³ de material desprendido alcanzaron la carretera que pasa a su pie.



Figura 7. Monitorización de carga en los cables en la barrera inferior del sistema RSN instalado en Vobarno.

Tras este evento se decidió instalar en el talud dos nuevas barreras dinámicas de protección contra caída de rocas capaces de amortiguar energías de 5000 kJ y de 60 y 40 metros de longitud respectivamente y monitoreadas con el sistema RSN.

En particular, en la barrera superior se instalaron 3 prototipos de módulos BPM, 3 celdas de carga y un dispositivo Trigger. En la barrera inferior se colocaron 2 módulos BPM, 2 celdas de carga y un dispositivo Trigger. El sistema se instaló el 22 de enero de 2019 y aún se encuentra operativo y en el período considerado no hubo fenómenos de desprendimiento de rocas que afectarían a las estructuras (Figura 7).

Durante el período de seguimiento considerado, se dieron varios problemas críticos que permitieron encontrar soluciones refinando el sistema desarrollado. Los problemas identificados incluyen corte del suministro de energía solar, daño de los sensores debido a la infiltración de agua de lluvia dentro de los circuitos eléctricos, la pérdida de funcionalidad de los módulos de radio que no pueden reconectarse automáticamente después de una desconexión de la red y el envío de pulsos del dispositivo Trigger durante eventos de tormenta. Estos problemas fueron solucionados. En cuanto al envío de pulsos en momentos de tormenta, esto llevó al desarrollo del sistema de alertas arriba mencionado.

En consecuencia, el sistema RSN permite monitorizar las barreras anti-desprendimiento midiendo la fuerza en los cables de anclaje superiores, la rotación de los postes y el alargamiento de los paños de malla. El sistema es automático y permite adquirir datos de las estructuras, almacenarlos en una base de datos, procesarlos con un

software especial y mostrar los resultados en una plataforma web. El software permite alertar automáticamente a los organismos responsables de la monitorización mediante el envío de SMS o correo electrónico o activando dispositivos de alerta remota.

5 CONCLUSIONES

La llegada de plataformas multifuncionales de recopilación de datos, junto con la red global robusta y confiable, ha permitido la transferencia de grandes cantidades de datos en tiempo real, su análisis automático y almacenamiento en grandes bases de datos relacionales. Esto hace posible la comparación automática y casi en tiempo real de varios tipos de mediciones derivadas de diferentes tecnologías, mejorando en gran medida la validación de los datos y, en consecuencia, la fiabilidad de los resultados. Además, la disponibilidad de períodos de observación más largos con mayor frecuencia de adquisiciones, en comparación con las mediciones tradicionales, permite el uso de bases de datos más grandes y procesamientos estadísticos más rigurosos.

Se han mostrado dos ejemplos de aplicaciones de sistemas de monitorización adecuados a dos tipos de estructuras (túneles y barreras flexibles) en los que se ha logrado una adecuada adaptación de los sistemas de medida y control. La monitorización de obras en los años venideros debe aprovecharse de posibilidades de este tipo para evitar problemas de sobrecostes y accidentes valiéndose de las potencialidades del método observacional.

BIBLIOGRAFÍA

Alejano, L.R., Rodríguez-Dono, A., Veiga, M., (2012). Plastic radii and longitudinal deformation profiles of tunnels excavated in strain-softening rock masses. *Tunn. Undergr. Space Technol.* Vol. 30, pp 169–182.

Carranza-Torres, C., Fairhurst, C. (2000). Application of the Convergence-Confinement Method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Tunn. Undergr. Space Technol.* Vol. 15, pp 187–213.

Cavalca, E (2020). *Three-dimensional monitoring of the tunnel face: development of an innovative tool for pre-convergence monitoring*. Ph.D. thesis. University of Parma.

Dunncliff, J. (1988). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. Wiley-Interscience. New York

Fairhurst Ch. (1991). General philosophy of support design for underground structures in hard rock. In *Underground Structures: Design and Construction. Developments in Geotechnical Engineering*, Vol. 59B. Elsevier: Amsterdam.

Geobrugg (2021). Barreras anti-desprendimiento <https://www.geobrugg.com/>.

Hoek, E., (1999). *Practical Rock Engineering*. <http://www.rocsience.com>

Lunardi, P. (2000). The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils. *T&T International ADECO-RS*, May, 3–30.

Müller, L y Fecker, E. (1978) *Grundgedanken und Grundsätze der 'Neuen Österreichischen Tunnelbauweise'*, in *Felsmechanik Kolloquium Karlsruhe* 1978, Trans Tech Publications, Clausthal 1978, 247–262

Panet, M. (1995). *Le calcul des tunnels par la méthode des curves convergence-confinement*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées: Paris, 1995.

Paramassi (2021). Barreras anti-desprendimiento. <https://www.paramassi.es/>.

Peck, R.B. (1969) Advantage and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Geotech.* Vol. 19, pp 171-187.

Pérez-Rey, I., Riquelme, A., González-deSantos, L.M., Estévez-Ventosa, X., Tomás, R., Alejano, L.R. (2019) A Multi-Approach Rockfall Hazard Assessment on a Weathered Granite Natural Rock Slope. *Landslides* Vol. 16, pp 2005–2015.

Rocsience. (2021). RS2 Manual and Axisymmetric Analysis.

Savi, R. (2020). *Development and validation of monitoring systems for remote control of passive protection structures*. Ph.D. thesis. University of Parma.

Segalini, A., Carri, A. y Savi, R. (2017). Role of geotechnical monitoring: state of the art and new perspectives. *GEO-EXPO 2017*, Sarajevo, October 26-27, 2017.

Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S., (2009). Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. *Rock Mech. Rock Eng.* Vol. 42, pp 131–146.