

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.

Experiencias en la instrumentación geotécnica instalada en dos grandes túneles construidos recientemente en México

Antonio VARGAS CAMACHO^{a,1}

^aInstructor y asesor en instrumentación geotécnica Jubilado, Comisión Federal de Electricidad (CFE) México

Resumen. Se describen los objetivos, la instalación y la puesta en servicio de la instrumentación instalada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en los túneles de conducción del Río Grijalva (2010); uno de los pocos túneles en el mundo que tiene instalado un sistema de instrumentación geotécnica e hidráulica diseñado e implementado para operar bajo la superficie del agua y con flujo permanente, así como la instrumentación instalada en los túneles de desvío de la presa La Yesca (2014); túneles que durante la construcción funcionaron como túneles de desvío y durante la etapa de operación como túneles ancla debido al potencial deslizamiento de la ladera donde están construidos. El autor considera en sus conclusiones que el éxito de la instrumentación de ambos túneles radica en el impulso y desarrollo que ha dado la CFE a la instrumentación geotécnica desde que se implantó inicialmente para el monitoreo de la cortina y laderas de las grandes presas construidas desde la década de los años 50 hasta la fecha, en la experiencia en adaptar los instrumentos de fábrica a las necesidades del sitio y a la protección e instalación de los cables conductores de la señal hasta el exterior de los túneles para su automatización y monitoreo en tiempo real.

Palabras Clave. CFE, deslizamiento Juan de Grijalva, túneles Río Grijalva, Presa La Yesca.

1. Introducción

En México se han construido cortinas de gran altura y diversas excavaciones subterráneas; túneles de acceso, de desvío, cavernas, lumbreras y galerías. Entre ellas las construidas en el Sistema Hidroeléctrico Necaxa a finales del siglo XIX, las obras construidas por la Comisión Nacional de Irrigación (CNI) a partir de 1926, por la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) de 1947 a 1976, por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) de 1976 a 1989, por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de 1989 hasta la fecha, así como las construidas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) desde 1937 hasta la actualidad.

Algunas de las obras realizadas en México se han nutrido del denominado “Método Observacional” introducido e implementado por Karl Terzaghi y Ralph B. Peck en el metro de la ciudad de Chicago en 1939; dicho método involucra el uso de la instrumentación geotécnica para observar el comportamiento de las obras y realizar

¹ Corresponding Author, E-mail: antonio.vargas.camacho01@gmail.com. Calle Millet No. 78 Colonia Nochebuena C.P.03720 CDMX.

cambios al diseño durante su construcción y operación en función de la información recabada, posteriormente dicha metodología fue transmitida a eminentes ingenieros mexicanos que fueron alumnos, aprendices y posteriormente colegas de los más grandes pilares de la ingeniería geotécnica a nivel mundial, como Arthur Casagrande. De esta manera el Método Observacional se implementó en las grandes obras ingenieriles en México como las grandes presas, adicionalmente se aprendió a asimilar y adaptar la instrumentación geotécnica a los requerimientos de cada estructura y a las necesidades de los diseñadores. Entre las grandes presas construidas en México donde la instrumentación geotécnica fue parte esencial e imprescindible desde su etapa de proyecto destacan: Temazcal, Malpaso, La Soledad, Santa Rosa, El Novillo, El Infiernillo, La Villita, La Angostura, Chicoasen, El Caracol, Peñitas, Aguamilpa, Zimapan, Huites, El Cajón y La Yesca. La instrumentación permitió realizar los cambios pertinentes al diseño de la presa durante su construcción y ha permitido el monitoreo en su etapa de operación y lo largo de su vida útil.

Entre los primeros instrumentos geotécnicos utilizados en las grandes presas de México se encuentran: las referencias superficiales para la medición de desplazamientos horizontales y verticales en la superficie de las estructuras, los deformómetros tipo Cross Arms, los inclinómetros, los extensómetros de placas para la medición de desplazamientos internos, los niveles hidráulicos de asentamientos, las celdas de presión total, los piezómetros abiertos tipo Casagrande y los vertedores de aforo de filtraciones, todos estos instrumentos se instalaron en el cuerpo de la cortina y los empotramientos. Sus obras subterráneas se instrumentaron inicialmente con piezómetros abiertos tipo Casagrande, extensómetros de barra, plomadas instaladas en lumbreras, extensómetros de alambre en galerías y el aforo de las filtraciones, todos con medición manual.

La durabilidad y efectividad de los instrumentos que se instalaron en las grandes presas desde su construcción, recae en el desarrollo de la tecnología mexicana en instrumentación geotécnica llevado a cabo dentro de la CFE. El desarrollo se ha enfocado en: a). adaptar en México los instrumentos de fábrica para necesidades particulares de cada sitio, y b) el desarrollo de los ductos que protegen los cables conductores de la señal de los instrumentos hasta las casetas de instrumentación.

A partir del año 2000 se empezaron a instalar gran cantidad de instrumentos de cuerda vibrante en la cortina y laderas de las presas en México, entre estos instrumentos destacan: piezómetros eléctricos, celdas de presión total, extensómetros, deformímetros y clinómetros entre otros. El éxito para que estos instrumentos sean confiables y durables, radica en la tecnología desarrollada en la CFE para proteger los cables conductores de la señal y canalizarlos hasta la caseta de medición, donde se conectan al sistema de adquisición de datos y se configuran para su monitoreo y emisión de alertas automáticas.

Para ejemplificar la tecnología desarrollada por la CFE en la instrumentación geotécnica aplicada a túneles se describen dos casos de éxito, donde, gracias al desarrollo de la tecnología mexicana, se adaptaron los instrumentos de fábrica a las necesidades del proyecto, se protegieron los cables conductores de la señal mediante la canalización, y se automatizó el monitoreo para obtener información en tiempo real.

2. Caso 1, Túneles de Conducción del río Grijalva

El 4 de noviembre de 2007 a la altura del poblado Juan de Grijalva y aguas arriba de la presa Peñitas en Chiapas ocurrió un gran deslizamiento de tierra de 55 millones de m³ de los cuales 15 millones de m³ obturaron completamente el curso natural del río sobre su

lecho de aluvión, formando una obstrucción de 1200 m de longitud, 200 m de ancho y 70 m de espesor quedando totalmente comprometido el funcionamiento del Sistema Hidroeléctrico Grijalva debido al peligro de desbordamiento en las presas: La Angostura, Chicoasen, Malpaso y Peñitas. Ante un posible rompimiento del tapón formado de manera natural y para realizar lo más rápido posible el desazolve del río, se optó por iniciar la excavación de un canal a cielo abierto entre el 6 noviembre del 2007 y el 11 de marzo del 2008, trabajando 24 horas continuas durante 129 días, en una verdadera carrera contra el tiempo. Una vez concluidos los trabajos se pudo realizar un desfogue de 3000 m³/s por el canal excavado, desde entonces las centrales hidroeléctricas del Sistema Grijalva han funcionado normalmente.

Posteriormente el Comité Técnico que supervisó el funcionamiento del Canal Juan del Grijalva determinó que era necesario construir dos túneles ubicados aguas arriba del canal Juan del Grijalva para reducir los riesgos en caso de producirse otro deslizamiento que obstruyese nuevamente el cauce del río. El 10 de septiembre de 2008 la CFE informó la construcción de los dos túneles de conducción para dar solución definitiva a la contingencia generada por el deslizamiento; los túneles consistieron en dos excavaciones de sección portal de 14 m de ancho y 14 m de altura, ambos con una longitud aproximada de 1200 m y una distancia entre ejes de 45 m.

Los trabajos de excavación iniciaron en septiembre de 2009 y concluyeron en mayo de 2011. La excavación de los túneles se realizó por dos frentes con condiciones geológicas muy diferentes; desde el portal de entrada en el cadenamamiento 0+000 hasta el 0+800, la excavación se realizó en limolitas, y del 0+800 al portal de salida en el 1+200, en areniscas bien cementadas [1]. El comportamiento geotécnico durante la construcción de los túneles lo determinó la excavación en las rocas blandas limolitas, debido a que presentan una rápida alteración y disminución de su resistencia cuando fueron expuestas a variaciones o cambios de humedad, combinado con los sistemas de discontinuidades, fracturas y fallas verticales con presencia de flujo de agua y filtraciones al grado de provocar desprendimientos en los frentes de excavación. Las principales discontinuidades geológicas encontradas son las denominadas: Estrato Falla, Falla Las Cuevas y Falla El Boquete [2], en estas fallas se encontró presencia de agua, factor determinante para que se presentaran los caídos ocurridos, por lo cual se construyeron casquillos de refuerzo a base de concreto armado para su etapa de operación.

Los objetivos de la instrumentación durante la etapa de construcción fueron: 1) proteger al personal ante inestabilidad de la excavación. 2) identificar tratamientos adicionales necesarios al avanzar la obra, y 3) facilitar las adecuaciones al proyecto. Para monitorear el comportamiento de los túneles durante su construcción se instalaron inclinómetros, extensómetros de barras, líneas de convergencia, medidores de juntas, referencias superficiales, pozos de observación y piezómetros eléctricos. La instrumentación en esta etapa se midió de manera manual³.

En el portal de entrada se instalaron extensómetros ubicados sobre la bóveda de los túneles, por lo que se pudo registrar la relajación de la roca a 2, 4, 6 y 8 m sobre la bóveda durante toda la etapa de construcción. En el pilar central entre los dos túneles se instaló el inclinómetro I-PE1 el cual cruza el contacto geológico denominado Estrato Falla. En mayo de 2010 se detectó agrietamiento en la primera capa de concreto lanzado en el interior del túnel 1 el cual coincidía con esta estructura geológica que aparece en el portal de entrada de los túneles en un estrato casi horizontal a dos metros aproximadamente sobre las bóvedas del portal en dirección aguas abajo. El inclinómetro I-PE1 mostró una zona de cizallamiento exactamente en el cruce con el Estrato Falla. Por lo anterior, en julio de 2011 se decidió instalar instrumentación adicional en el portal de entrada

consistente en tres extensómetros; uno en la plataforma de la elevación 118.5 m con 30° de inclinación respecto a la horizontal, los cuales cruzan la Falla Portales y el Estrato Falla, y otros dos a la elevación 86.5 m; inclinados 30° respecto a la horizontal de forma ascendente, además de dos inclinómetros a ambos lados de los túneles similares en desplante al I-PE1, y un inclinómetro adicional, aguas abajo del I-PE1, así como secciones de convergencia en el interior de los túneles en la zona donde aparecía el Estrato Falla. Los resultados obtenidos mediante esta instrumentación permitieron decidir el desplante de las estructuras de izaje para las compuertas por debajo del Estrato Falla reubicando las estructuras de cierre hasta el portal de entrada de ambos túneles.

En el portal de salida, la excavación de ambos túneles y los cortes en bermas fueron realizados totalmente en areniscas por lo que presentaron un comportamiento estable. En esta zona se instalaron seis extensómetros de barra los cuales no mostraron tendencia de movimiento en las estructuras geológicas donde fueron instalados.

En el interior de los túneles se instalaron líneas de convergencia, medidores de juntas y extensómetros con barras de 9, 18, 24 y 30 m de longitud en la clave de los túneles. Los movimientos más significativos en ambos túneles se presentaron en las zonas influenciadas por las fallas Las Cuevas y El Boquete. En general los desplazamientos registrados con los extensómetros y las líneas de convergencia indican que la relajación de la roca en los puntos de medición tendió a estabilizarse una vez que pasó el frente de excavación y se efectuaron los tratamientos especificados. En la falla Las Cuevas se presentaron caídos en el frente de la excavación en ambos túneles. El túnel 2 fue afectado por el caído ocurrido en el frente durante la excavación de la media sección superior de la falla el Boquete.

Durante la etapa de construcción, los resultados de la instrumentación y los análisis Geológicos y de Mecánica de Rocas permitieron a las Autoridades de CFE tomar decisiones respecto a la efectividad de los tratamientos a la roca en las zonas críticas, observar oportunamente la tendencia a la estabilización de cada sección y definir los sostenimientos, refuerzos y velocidad de avance durante todo el proceso constructivo.

Por la importancia de los túneles para el funcionamiento del Sistema Hidroeléctrico del río Grijalva, las condiciones geológicas, los criterios de diseño adoptados en el revestimiento de los mismos, por el tipo de roca, y por las experiencias que se presentaron durante la construcción de los túneles, se decidió diseñar un sistema de instrumentación geotécnica para la etapa de operación cuyos objetivos fueron: 1) conocer el comportamiento a lo largo de cada túnel y en particular, en las zonas de las principales fallas geológicas. 2) contar con mediciones en tiempo real para implementar acciones correctivas oportunas, y 3) conocer a largo plazo el comportamiento estructural de los túneles, el cual dependerá del desempeño del revestimiento adoptado.

Para el diseño de la instrumentación geotécnica en la etapa de operación se consideraron los siguientes mecanismos o factores que afectarían la estabilidad de los túneles: a) la carga de roca, b) el comportamiento del macizo rocoso, y c) el comportamiento del revestimiento de los túneles con el tiempo. La carga de la roca tiene que ver con las propiedades geotécnicas del macizo rocoso, con la geometría de los túneles y con el procedimiento constructivo. El comportamiento del macizo rocoso indica el cambio de las propiedades geotécnicas de la roca con el paso del tiempo, ya que las limolitas se alteran rápidamente por el cambio de humedad, lo cual podría modificar la carga de roca o su distribución alrededor de los túneles. Con estos conceptos se diseñó la instrumentación geotécnica, considerando que podrían generarse deformaciones por la alteración de la limolita en la periferia de los túneles y el incremento de la carga de roca con el tiempo, principalmente, por el cambio de humedad a las que puede quedar

expuesta por las variaciones del nivel freático y por la infiltración del agua de precipitación a través de las fallas geológicas y su fracturamiento.

Para garantizar el buen funcionamiento de la instrumentación para la etapa de operación, se diseñó un sistema de instrumentación especial y con características únicas a nivel mundial las cuales son: a) la obtención y transmisión de la información de los instrumentos instalados en toda su longitud y funcionando bajo el espejo y flujo del agua sin interferir con su funcionamiento, al exterior de los túneles, b) su medición en tiempo real y c) el monitoreo de toda su longitud y en las principales fallas geológicas. Todo lo anterior permite actualmente a las autoridades de la CFE, a través de sus técnicos e ingenieros contar con información oportuna para la toma de decisiones. Este avanzado y único sistema de instrumentación fue implementado gracias a la capacidad, experiencia y a la calidad de la tecnología desarrollado por la CFE en la instrumentación de sus grandes presas, en el monitoreo del funcionamiento a largo plazo de su infraestructura, y para obtener información de interés para el diseño de túneles más eficientes, seguros y económicos en futuros proyectos.

Los instrumentos seleccionados para instalarse dentro de los túneles y para operar de manera automática en la etapa de operación fueron: extensómetros eléctricos de barra, celdas de presión NATM y piezómetros eléctricos. Se instalaron extensómetros de barra con cabezal eléctrico para verificar la estabilidad del revestimiento de los túneles, principalmente en las zonas limítrofes a las fallas geológicas encontradas desde el portal de entrada, además, en los primeros 500 m dentro de los túneles se dispuso un arreglo de tres extensómetros a ambos lados de fallas geológicas importantes, seguidos de arreglos de dos extensómetros más alejados de la falla y finalmente de un extensómetro fuera de la zona de influencia de la falla; lo anterior siguiendo el criterio de verificar que las zonas de falla detectadas no evolucionen fuera de las zonas revestidas con concreto hidráulico. Los extensómetros están alojados dentro de barrenos de diámetro NQ de 10 y 15 m de profundidad.

En el túnel 1 se instrumentaron 25 secciones transversales con 37 extensómetros y 25 secciones con 39 extensómetros en el túnel 2. Las celdas de presión del tipo NATM se instalaron embebidas en el concreto en las zonas correspondientes a las fallas más importantes donde se construyeron casquillos de concreto hidráulico y marcos empacados en concreto, las celdas permitirán conocer los esfuerzos actuantes sobre el revestimiento de los túneles. Los piezómetros eléctricos se instalaron dentro de las zonas de fallas y también en zonas donde la roca no presenta fracturas como zonas “testigo”. Los piezómetros en la zona de falla permitirán conocer la carga hidráulica y su variación estacional; para compararla con el valor del nivel piezométrico en la matriz de la roca. Los piezómetros eléctricos están instalados dentro de barrenos de diámetro NQ de 10 m de profundidad bajo el piso de los túneles y alojados dentro de una cámara piezométrica de dos metros de longitud.

Para proteger del flujo del agua a los cables conductores de señal de los instrumentos dentro del túnel, todos los cables se alojaron dentro de ductos plásticos de ADS de cuatro pulgadas de diámetro embebidos en el concreto del “chaflan” o cubeta de ambos túneles, Figura 1. En el periodo de febrero a agosto de 2011 se instalaron 10,000 m de ductos, y dentro de ellos se instalaron 70 mil metros de cables de señal correspondientes a los 76 extensómetros eléctricos de barra, 10 piezómetros eléctricos y 24 celdas de presión total NATM, que corresponden a la instrumentación geotécnica, además de 24 medidores ultrasónicos “Argonaut” para la medición del perfil de velocidades del agua cerca de las paredes de concreto lanzado, 16 medidores de velocidad de flujo “tiempo en tránsito” para determinar el gasto que transita por cada túnel en tiempo real, 54 celdas de presión

y 20 celdas de medición de nivel; ambos tipos de instrumentos equipados con piezómetros de cuerda vibrante para medir la posición del espejo de agua y cinco escalas para la medición del nivel del río dentro y fuera de los túneles, estos últimos correspondiente a la instrumentación hidráulica.

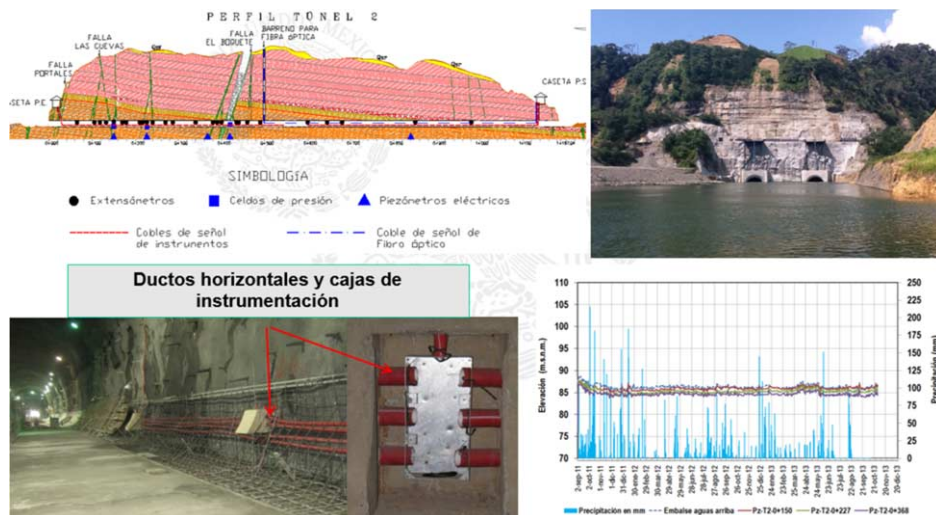


Figura 1. Instrumentación geotécnica instalada en el túnel No 2 de conducción del río Grijalva. Figura cortesía de la CFE.

Las cajas de registro y las tapas de protección especiales, cuya función es alojar y proteger a los sensores correspondientes a la instrumentación hidráulica a la vez que permitirán dar mantenimiento a estos instrumentos fue diseñada por los técnicos e ingenieros de CFE para garantizar que el flujo del agua, los boleos transitando sobre la plantilla y los troncos arrastrados en la superficie no dañaran los ductos troncales que conducen los cables a todo lo largo de los túneles. Adicionalmente estos ductos se conectaron con barrenos verticales de ocho pulgadas de diámetro perforados en la zona del portal de entrada y de salida de ambos túneles para llevar el cableado de cada túnel a las dos casetas de instrumentación donde se encuentran los multiplexores y dataloggers para el registro de datos. En el exterior e interior de los túneles se instalaron tres mil metros de fibra óptica para transmitir la señal de todos los instrumentos en tiempo real vía intranet; desde las dos casetas de instrumentación construidas en ambos portales. Fue determinante instalar los ductos de protección, los instrumentos y perforar todos los barrenos donde quedaron alojados todos los instrumentos, así como los 12 barrenos verticales de ocho pulgadas de diámetro que conducen los cables de señal de los instrumentos a las dos casetas de instrumentación ubicadas en los portales de entrada y salida, así como un barreno de 130 m de profundidad que lleva el cable de fibra óptica desde la bóveda del túnel 2 hasta la superficie contemplados en el proyecto antes de la entrada en operación de los túneles.

El comportamiento observado mediante la instrumentación de los túneles es de estabilidad. Las mediciones registradas en las celdas de presión total y extensómetros eléctricos instalados para monitorear el comportamiento del revestimiento de los túneles pueden interpretarse como una recompresión de la roca que se relajó por la propia excavación de los túneles, particularmente en las limolitas por tratarse de una roca blanda

y en la zona de fallas geológicas debido a la influencia que tiene el agua que se infiltra de la lluvia. Los valores de los desplazamientos y los niveles de esfuerzo medidos no comprometen la estabilidad de los túneles, sin embargo, se continúa con las mediciones de la instrumentación para determinar si el estado de esfuerzos y deformaciones ha alcanzado un equilibrio en la masa de roca [3].

Para lograr el éxito de la instrumentación de los túneles, fue necesario realizar ingeniería de detalle para las siguientes cuatro etapas: 1.- Actividades previas al diseño, que consistió en la identificación de las secciones estructurales y la caracterización geotécnica geológica del trazo de los túneles; con esta información se determinaron las secciones de control a instrumentarse. 2.- Diseño de la instrumentación, en donde se definieron los parámetros a medir y los instrumentos requeridos. 3.- Desarrollo e implementación de la instrumentación, donde se detallaron todos los aspectos referentes a la instrumentación; ingeniería de detalle, preparativos, adaptación del instrumento, instalación, medición, y transmisión de datos. 4.- Seguimiento al funcionamiento de la instrumentación; mantenimiento, mejoramiento, interpretación y análisis, e informes de resultados.

Sólo con un conocimiento adecuado de los objetivos del diseño y tomando consciencia del motivo para lo cual se instala la instrumentación, se puede hacer un correcto diseño e implementación de un sistema de instrumentación exitoso, junto con el correspondiente análisis de la evolución de las mediciones en el tiempo, lo cual permite detectar el estado en el comportamiento estructural de los túneles que pueden indicar zonas con inestabilidad u otras situaciones límites. Además, un seguimiento adecuado ayudará también a mejorar y optimizar los diseños estructurales realizados en fase de proyecto y profundizar en la seguridad y el conocimiento de los fenómenos estudiados de cara al diseño y construcción de obras futuras.

3. Caso 2. Túneles de desvío y tapones estructurales de la presa La Yesca

Los túneles se localizan sobre el Río Santiago a 105 km al NW de la ciudad de Guadalajara, ambos túneles se encuentran excavados en la margen izquierda correspondientes al estado de Jalisco. La Obra de Contención de la presa La Yesca es de tipo "Enrocamiento con Cara de Concreto" de 206.5 m de altura, las Obras de Generación subterráneas tienen instaladas 2 turbinas tipo Francis de eje vertical de 375 MW cada una, se tiene prevista una generación media anual de 1,210 GWh. La Obra de Excedencias a cielo abierto cuentan con 6 compuertas radiales para un gasto máximo de diseño de 15,915 m³/s., y las Obras de Desvío con 2 túneles sección portal de 14 m x 14 m para un gasto máximo de 7,578 m³/s.

En abril de 2008, fue detectada una estructura geológica en la margen izquierda del cauce conocida como Falla Colapso la cual empezó a manifestó sus efectos como falla activa en las excavaciones de los portales de los túneles de desvío y del canal de llamada de la obra de excedencias, así como los caminos ribereños de construcción 6MI y 9 MI mediante un claro deslizamiento de una masa rocosa de un volumen estimado de más de 5 millones de toneladas, amanzanado seriamente la seguridad de las obras en construcción y fundamentalmente la de los trabajadores e instalaciones. El 14 de mayo de 2008 se confirmaron los desplazamientos de esta gran masa de roca inestable al detectarse visualmente el movimiento en la elevación 448,0 m del talud del camino 6MI (falla Colapso), la cual mostraba su plano de discontinuidad relleno con arcilla plástica, que contenía estrías producidas por movimientos lentos del tipo creep.

La instrumentación instalada antes de detectarse el desplazamiento en el portal de entrada de los túneles consistía en extensómetros de barra con medición manual para verificar el comportamiento de los taludes formados a partir de dichas excavaciones. En talud frontal del portal de entrada fueron instalados 8 extensómetros ubicados a diferentes elevaciones. A partir la detección del movimiento y con la finalidad de determinar la magnitud de la cuña de roca afectada por el plano de falla, así como las direcciones y velocidades de desplazamiento se instaló un sistema de instrumentación constituido por instrumentos para detección de desplazamientos a superficie y a profundidad. La instrumentación adoptada para esta eventualidad consistió en un sistema de control topográfico integrado por 43 referencias superficiales distribuidas sobre la zona de estudio y monitoreadas respecto a cuatro bases de centraje forzoso localizadas en la margen derecha utilizando un Taquímetro electrónico para la determinación de desplazamientos mediante la medición de distancias y por trilateración, cuatro bancos de nivel para el monitoreo de desplazamientos verticales en las referencias superficiales, tres medidores de juntas tridimensionales para conocer el desplazamiento diferencial tridimensional en la traza de la falla teniendo un punto de referencia en la zona en movimiento y otro punto en la zona estable, así como cinco inclinómetros verticales para determinar los desplazamientos horizontales a profundidad. Se estableció un programa de medición en estos instrumentos con una periodicidad diaria y en el caso de los medidores de juntas mecánicas la frecuencia de las mediciones fue establecida cada tres horas con la finalidad de permitir una toma de decisiones oportuna en caso de presentarse desplazamientos mayores a los permisibles o esperados. Con los resultados obtenidos de esta instrumentación las autoridades de la CFE determinaron las acciones y obras adicionales a realizar para la estabilización de la zona en estudio, entre ellos la construcción de un Monolito de concreto en los portales de entrada de los túneles de Desvíos, cuatro etapas de retiro de material “descopetes”, control de voladuras en las Obras de Desvío y Obras de Excedencias y la construcción de un grupo de seis Lumbreras de Cortante y el giro del eje de la Cortina [4].

La instrumentación instalada antes y durante el llenado del embalse consistió en una segunda etapa de instalación de instrumentos para complementar el monitoreo continuo del comportamiento de la zona aleadaña a los túneles de desvío. El incremento en la cantidad de instrumentos para verificar la efectividad de las obras de estabilización incluye: a) 100 referencias adicionales a diferentes elevaciones para el monitoreo de los desplazamientos horizontales y verticales a superficie de la zona inestable. b) 26 medidores de juntas tridimensionales manuales para conocer la dirección y magnitud de desplazamiento de la zona inestable. c) siete inclinómetros verticales para conocer los desplazamientos horizontales a profundidad. d) 12 Estaciones automáticas GPS para la determinación de los desplazamientos horizontales y verticales en tiempo real. Debido a las diversas actividades para la estabilización del bloque inestable y en particular los descopetes o cortes de material fue destruido un gran porcentaje de la instrumentación instalada, en el caso de las estaciones automáticas GPS fueron retiradas y en algunos casos reubicadas.

Debido a sus condiciones geotécnicas y dada la necesidad de conocer el comportamiento de la zona estabilizada en la etapa de operación de la central, se diseñó un proyecto de instrumentación que permitirá continuar con el monitoreo de esta estructura una vez concluido el llenado del embalse y durante la vida útil de la central. Este sistema está basado en instrumentación electrónica, la cual permite continuar con el monitoreo de esta estructura en forma automatizada y para lo cual se canalizó todo el cable conductor de la señal a través de los ductos diseñados por CFE para garantizar su

funcionamiento a largo plazo. El proyecto incluyó los siguientes instrumentos: 31 piezómetros eléctricos de cuerda vibrante con rango de medición de 2.0 MPa (10 bajo la falla, 11 en la falla y 10 por arriba de la falla), cuatro extensómetros de barras con cabezal eléctrico arriba de la falla, cinco inclinómetros instrumentados con sensores in situ para medición remota, cuatro medidores de juntas eléctricos en arreglo tridimensional en la falla, 10 celdas de presión NATM en las Lumbreras de Cortante, 12 rosetas de strain gages en arreglo ortogonal, 30 extensómetros lineales en el tapón ancla del túnel de desvío No.1, y 34 extensómetros lineales en el tapón ancla del túnel de desvío No. 2.

Los piezómetros eléctricos se ubicaron a diferentes elevaciones en las bermas resultantes de los procesos constructivos, así mismo seis de ellos fueron instalados en las lumbreras de Cortante LC-8 y LC-12 aprovechando la excavación de las mismas. Los piezómetros fueron instalados con tres sensores, los bulbos A de los piezómetros se encuentran colocados bajo la falla, los bulbos B en la falla y los bulbos C por arriba de la falla Colapso en todos los casos. Los extensómetros de barras múltiples con cabezal eléctrico se colocaron en las Lumbreras de Cortante LC-8 y LC-12, todos ellos fueron instalados por arriba de la falla con la finalidad de evaluar el comportamiento de la zona estabilizada respecto al relleno de concreto de las lumbreras durante la etapa de operación de la central, se instalaron con un arreglo de cuatro barras cada uno con profundidades de 3, 6, 9 y 12 m en los ejes mayor y menor de ambas lumbreras. En el caso de los sensores in situ, se determinó instalarlos en los inclinómetros en los cuales se registró de una manera clara el comportamiento de la falla Colapso, con este criterio se decidió alojarlos en los inclinómetros I-2', I-6, I-7 e IT1-1, así mismo se decidió realizar la instalación de un ademe de inclinómetro en el relleno de las Lumbreras LC-9 y 10 para alojar el último arreglo de sensores in situ. Esta tecnología de sensores permite realizar la medición de desplazamientos horizontales aun en instrumentos bajo el nivel del embalse y están conectados al sistema automatizado de mediciones. Los medidores de juntas eléctricos se instalaron sobre la traza de la falla Colapso; 3 de ellos en superficie y uno dentro del túnel de desvíos No.1. El arreglo consiste en tres sensores de medición de desplazamientos orientados en los ejes norte-sur, este-oeste y en el sentido vertical tomando como referencia fija el bloque inferior y como referencia móvil el bloque superior o zona estabilizada. Con la finalidad de verificar los esfuerzos generados por el relleno de concreto en las lumbreras de cortante sobre el macizo de roca fueron instaladas 10 celdas de presión tipo NATM, 6 de ellas en la lumbrera de cortante LC-11 y las 4 restantes en la Lumbrera LC-8. Así mismo, fueron instalados 12 juegos de rosetas de strain gages para determinar las micro deformaciones en el relleno de concreto de las lumbreras de cortante.

Con la finalidad de verificar el comportamiento estructural de los túneles, fue necesario instalar un sistema de instrumentación a partir de extensómetros lineales embebidos en los lechos superior e inferior dentro del tapón de concreto armado masivo considerado tapón ancla. En el túnel 1 se instalaron y se encuentran operando 30 extensómetros en línea longitudinal dentro del túnel tanto en su lecho inferior como en el lecho superior, mientras que para el túnel 2 se tienen instalados 34 sensores, Figura 2. En los taponos estructurales no hay indicios de movimiento en la traza de la falla "Colapso", como lo indican los datos de los extensómetros eléctricos instalados en gran parte de su longitud. La deformación unitaria relativa entre el lecho superior e inferior es del orden de 0,0004 y no es indicativo de movimiento del macizo rocoso a través de la falla. Los principales incrementos de deformación se debieron a la variación de la temperatura en el concreto por el fraguado y a la saturación de la roca [5]. Para poder instrumentar con éxito en los túneles ancla o taponos estructurales, también fue necesario

primero realizar una ingeniería de detalle con personal experimentado, adaptar los instrumentos de fábrica a los requeridos para instalarse embebidos en el concreto del ambos túneles, así como garantizar la protección y elongación de su cableado durante la vida útil de la estructura. A la fecha, prácticamente todos los instrumentos instalados están funcionando correctamente (Figura 2).

La instrumentación instalada en la zona inestable y dentro de los túneles ancla de La Yesca, han sido de gran relevancia para la toma oportuna de decisiones e implementación de las obras complementarias para la estabilización de la misma, así mismo, con la medición continua se ha verificado la efectividad de dichas obras acorde a las políticas de operación de la central y permite la toma de decisiones oportunas respecto al comportamiento de la misma, por lo cual es de vital importancia el continuo monitoreo, emisión y análisis de los resultados registrados por dicha instrumentación.

A la fecha las mediciones realizadas a partir del inicio del llenado a los instrumentos instalados en la zona estabilizada y dentro de los túneles ancla no presentan comportamientos desfavorables [6].

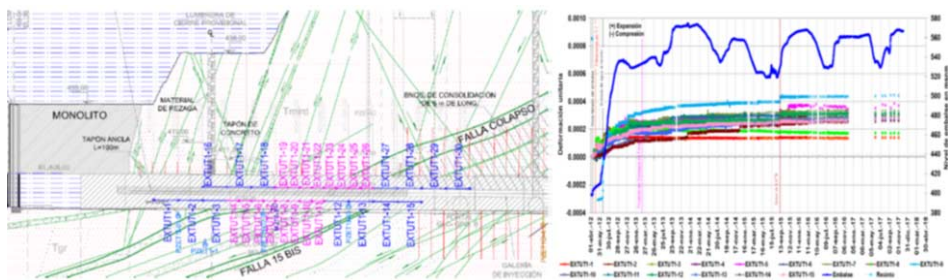


Figura 2. Instrumentación instalada en los túneles ancla o taponos estructurales de presa La Yesca. Figura cortesía de la CFE, GEIC.

4. Conclusiones

1. La geología de los sitios para construir nuevas presas y sus respectivas obras subterráneas son cada vez más desfavorable, por ello, la instrumentación geotécnica es día con día más útil y necesaria en proyectos de gran envergadura.
2. La instrumentación y el Método Observacional ayudan a garantizar la seguridad durante la construcción y operación de las obras subterráneas, sin importar si la medición es manual o automática, pero que permita tomar decisiones oportunas y eficaces mediante una instrumentación, durable, confiable a largo plazo, y automatizada de ser deseable para su monitoreo en tiempo real.
3. El éxito de la instrumentación de los túneles para su etapa de operación radica en el estado del arte y de la experiencia técnica desarrollada en la instrumentación geotécnica para adaptar los instrumentos de fábrica a las necesidades del sitio, y para proteger y conducir los cables conductores de la señal hasta el exterior de los túneles para su automatización y poder disfrutar de su medición en tiempo real durante su etapa de operación y vida útil.
4. El espíritu de presentar los dos casos mencionados en este artículo ante la comunidad geotécnica, es reflexionar ante los incidentes y fallas sucedidos en túneles y cavernas donde, sin lugar a dudas, con la implementación de una instrumentación geotécnica tecnológicamente avanzada, con calidad, cantidad,

ubicación, una adecuada ingeniería y realizada por personal experimentado, se hubieran evitado gran parte de estas fallas e incidentes que muchas veces han costado vidas humanas, fuertes pérdidas económicas y retrasos en la entrada en operación de la infraestructura que necesita disfrutar la sociedad.

Agradecimientos

El autor agradece el apoyo de las autoridades de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC) y de la Subgerencia de Seguridad de Estructuras (SSE) para presentar este artículo técnico, en reconocimiento a los grandes ingenieros y técnicos que son y han sido parte de esta gran empresa pública mexicana.

Referencias

- [1] CFE, GEIC Subgerencia de Estudios Geológicos (2011). "Monografía Geológica Túneles río Grijalva, Estado de Chiapas", México
- [2] Franco R. Rodríguez S. y Hernández B. (2011). "Diseño geotécnico de los túneles de conducción de río Grijalva, Chiapas", México
- [3] Antonio Vargas C., F. Barrón T. y G. Macedo G. Diseño, instalación y puesta en servicio de la instrumentación de los túneles de conducción del Río Grijalva, Chiapas. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica SMIG 2012 Cancún México.
- [4] J. Rodríguez., H. Marengo., J.D. Alemán y R. Rivera. Modelación numérica y análisis del deslizamiento de la ladera izquierda de una Central Hidroeléctrica en México, presentado durante su construcción. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica SMIG 2012 Cancún México.
- [5] Antonio Vargas C., F. Barrón T. y G. Macedo G. Diseño, instalación y puesta en servicio de la Instrumentación adicional para la zona estabilizada de margen izquierda del P.H. La Yesca, Jal., durante el primer llenado y operación. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica SMIG 2012 Cancún México.
- [6] Moreno Hernández Manuel (2012) "Informe de mediciones del primer llenado del embalse, La Yesca MI T-1 28jul12.