

# Inspección y rehabilitación del *Túnel Hidráulico de Cerro Azul* (Ecuador)

El *Túnel de Cerro Azul* construido en 1977 con 6450 m de longitud y 22 m<sup>2</sup> de sección transversal, forma parte del trasvase Daule-Peripa. En 2007, el túnel sufrió un derrumbe en su parte central provocando una caverna de 1.300 m<sup>3</sup> sobre la bóveda del túnel. La reparación de emergencia en ese año no llegó a rellenar la caverna. En 2012 se consideró necesaria la reparación definitiva del túnel, para lo cual se siguió una metodología que es la que se describe en este artículo

El *Túnel Cerro Azul*, construido en 1997, forma parte del sistema Trasvase Daule – Peripa, perteneciente a la Demarcación Hidrográfica del río Guayas y gestionado por SENAGUA, que consiste en la transferencia del recurso hídrico desde la cuenca excedentaria del Daule a las áreas áridas de la Península de *Santa Elena* y al cantón *Playas* de la provincia del *Guayas*.

La finalidad de esta transferencia de agua es atender el abastecimiento para consumo humano, producción agropecuaria, potenciación de la producción industrial y para el desarrollo urbano y turístico del sector. En la **Fig. 1** se muestra la situación de *Túnel Cerro Azul*.

El Túnel, con una longitud de 6.450 m y una sección transversal de 22,5 m<sup>2</sup>, sufrió en 2007 un derrumbe en su parte central que llegó a colapsarlo parcialmente, provocando una caverna de 1300 m<sup>3</sup> sobre la bóveda del túnel. La caverna que se creó tiene una sección de 178 m<sup>2</sup>; unas 8 veces mayor que la sección del túnel; por lo que su creación solo fue posible por la combinación de un colapso tenso-deformacional y el efecto de transporte del agua que circulaba por el túnel.

En el año 2007 se hizo una reparación de emergencia; pero no llegó a rellenarse la caverna. En 2012 SENAGUA se planteó la posibilidad de incrementar el caudal transportado actualmente de 22 m<sup>3</sup>/s hasta alcanzar los 44 m<sup>3</sup>/s de diseño; para ello, además de los condicionantes técnicos para efectuar el bombeo, se consideró necesario reparar definitivamente el *Túnel de Cerro Azul*.

Para poder definir el alcance de la reparación se tuvo que hacer una inspección del estado del túnel, para lo cual se siguió la metodología que se presenta en el apartado siguiente.

**Palabras clave:** BÓVEDA, CAVERNA, CONVERGENCIA, FALLA, HIDRÁULICO, INSPECCIÓN, REHABILITACIÓN, REPARACIÓN, SECCIÓN, SOSTENIMIENTO, TÚNEL.



**C. BERNAL. SENAGUA.** Guayaquil, Ecuador.

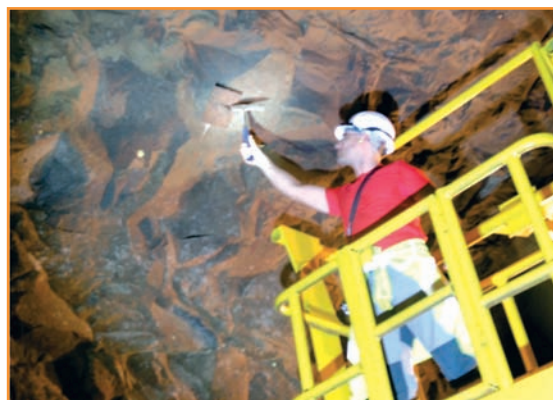
**J. CEVALLOS. CEVACONSULT Cia. Ltda. Ingenieros.** Guayaquil, Ecuador.

**B. CELADA e I. TARDÁGUILA. GEOCONTROL, S.A.** Madrid, España.

## Metodología de inspección y resultados obtenidos

Para realizar la inspección se puso a punto un sistema de iluminación, montado sobre un camión, que también permitía el acceso a la bóveda del túnel.

La inspección se realizó recorriendo a pie todo el trazado del túnel y accediendo a la bóveda mediante la plataforma montada sobre el camión; tal como se muestra en la **Foto 1**.



**[Foto 1].-** Inspección de la bóveda.

Como resultado de los trabajos de inspección se obtuvieron los siguientes mapeos:

- Daños en el Túnel.
- Sostenimientos colocados.
- Calidad de los terrenos.
- Fallas atravesadas.

## Daños en el túnel

El *Túnel Cerro Azul* presenta ocho tipologías de daños, que se enumeran a continuación:

- **TIPO I:** Tramos sin revestimiento con bulones corroídos, en una longitud total de 2.545 m; que supone el 39,5% de la longitud total.
- **TIPO II:** Tramos con despegues de hormigón proyectado, grietas y perfil irregular, que totalizan 3.250 m y suponen el 50,4% de la longitud.
- **TIPO III:** Tramos con Marcos IPN parcialmente recubiertos con hormigón proyectado; en total 10 m.
- **TIPO IV:** Tramos con hormigón encofrado armado fisurado; en una longitud total de 55 m.
- **TIPO V:** Entronques con nichos; cuyo sostenimiento sin hormigón proyectado, son bulones y que totalizan 165 m.
- **TIPO VI:** Falso Túnel con armadura vista corroída en una longitud de 110 m.

**[Fig. 1].-** Localización del Túnel Cerro Azul.



# Rehabilitación

- TIPO VII: Tramos con capa de hormigón proyectado agrietado en una longitud de 90 m.
- TIPO VIII: Zona de la caverna; que afecta a 30 m.

En la **Foto 2** se muestra un tramo del túnel con hormigón proyectado en el que se ha producido grietas; fenómeno que corresponde a la tipología de daños, II y; que es la más frecuente.

En cuanto a la segunda tipología de daños más frecuente, la I, en la **Foto 3** se muestra la vista de un bulón corroído.



[Foto 2].- Rotura del sostenimiento.

[Foto 3].- Perno dañado por corrosión.

### Calidad de los terrenos

En los abundantes tramos del túnel en los que no hay revestimiento se ha podido determinar la calidad del terreno, mediante el **RMR**, obteniéndose la tramificación que se indica en la **Tabla I**.

Desde Abscisa	Hasta Abscisa	RMR	Litología
0+100	3+100	55-61	Conglomerados, areniscas, limolitas
3+100	3+400	35-45	Limolitas silicificadas (zona de fallas)
3+400	6+450	44-55	Limolitas silicificadas

[TABLA I].- Índice RMR en el Túnel Cerro Azul.

### Tipo de sostenimiento

La calidad de los terrenos en el **Túnel de Cerro Azul** es de tipo medio mayoritariamente,  $40 < RMR < 60$ ; razón por la cual el sostenimiento más frecuente está constituido por bulones y hormigón proyectado, tal como se muestra en la **Tabla II**.

Sostenimiento	Longitud (m)	Porcentaje (%)
Solo bulones	2,545	39.46
Bulones y hormigón proyectado	3,250	50.04
Marcos y hormigón proyectado	10	0.15
Hormigón encofrado	645	1.00

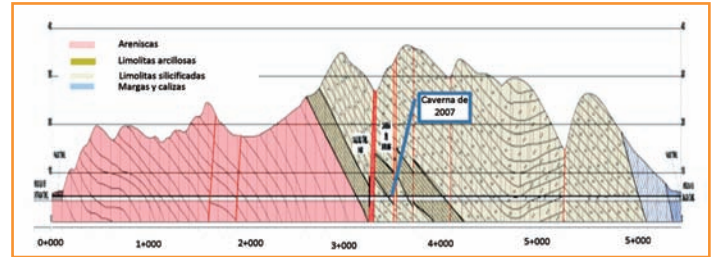
[TABLA II].- Sostenimiento en el Túnel Cerro Azul.

### Fallas atravesadas

En la **Fig. 2** se muestra el perfil longitudinal del **Túnel de Cerro Azul**.

El perfil geológico del **Túnel de Cerro Azul**, básicamente, está constituido por areniscas, limolitas y un pequeño tramo de margas y calizas.

Las areniscas, que ocupan la mitad del túnel, están separadas de las limolitas por una gran falla y otra de menor entidad; entre las cuales está ubicada la caverna que se produjo en 2007.



[Figura 2].- Perfil longitudinal del Túnel de Cerro Azul.

### Medidas correctoras

De acuerdo con los daños observados en la inspección se definieron las seis tipologías de refuerzo que se muestran en la **Tabla III**.

Las más intensamente aplicadas han sido la I y la II; para cubrir con la tipología de daños presentada en el apartado de *Daños en el túnel*.

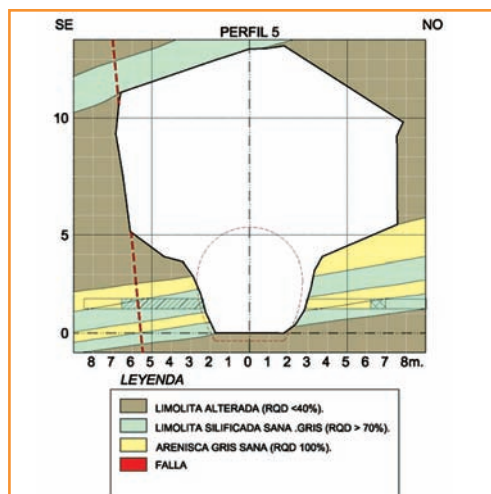
TIPO	DESCRIPCIÓN	REPARACIÓN
I	Bulones corroídos	Reposición de bulones y proyección de hormigón proyectado
II	Grietas en el hormigón proyectado	Bulones y proyección de hormigón proyectado
III	Marcos metálicos sin hormigón proyectado	Proyección de hormigón proyectado
IV	Armadura corroída	Limpieza con chorro de arena, pintura epoxi y mortero de reparación
V	Entronques sin rellenar	Relleno y muro de hormigón
VI	Caverna	Reconstrucción del túnel y relleno

[TABLA III].- Tipologías de refuerzo.

### Diseño de la recuperación de la caverna en 2007

En la **Fig. 3** se muestra la sección transversal, por el punto medio, de la caverna que se formó en el año 2007; que está situada prácticamente en el centro del túnel.

Esta caverna tiene una altura sobre la solera del túnel de 15,5 m y una anchura máxima de 15m. En la **Foto 4** se puede apreciar su aspecto; vista desde el hastial Este.

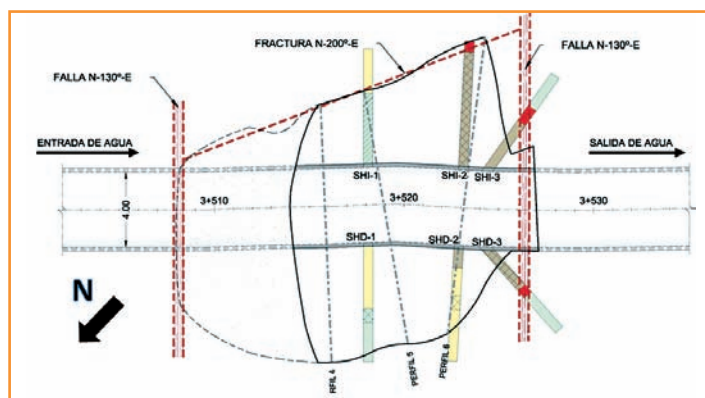


[Figura 3].- Sección transversal por el punto medio de la caverna.



■ [Foto 4].- Caverna formada en 2007.

En la inspección realizada se comprobó que la geometría de la caverna estaba condicionada, en la dimensión Este-Oeste, por la presencia de dos fallas, de rumbo y buzamiento N-130-E y 80°S; que son transversales al trazado del túnel, y en el sentido del eje del túnel, por una fractura cuyo rumbo y buzamiento es, N-200-E 80°S. El techo de la caverna corresponde a un plano de estratificación. En la Fig. 4 se muestra la planta geológica-geotécnica de la caverna.



■ [Fig. 4].- Planta geológica-geotécnica de la caverna.

En la inspección realizada se comprobó que el hormigón proyectado colocado en la reparación de 2007 estaba agrietado; tal como se muestra en la Foto 5.

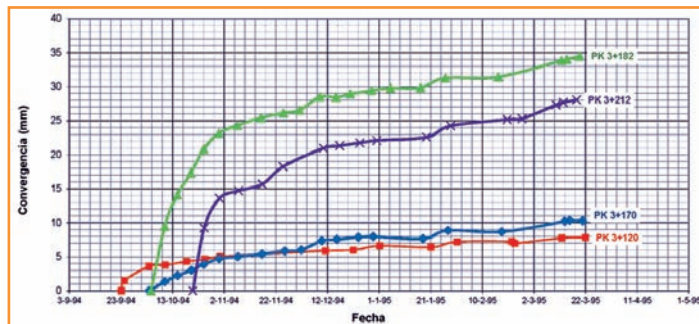
La existencia de estas grietas es una evidencia de que la caverna ha sufrido movimientos desde su reparación en 2007 hasta la fecha, movimientos que se pueden explicar por el fenómeno de *squeezing*; que se produce cuando los terrenos soportan una presión superior al 60% de su resistencia a compresión.

Por ello se revisó con detalle la información contenida en el proyecto *as built* y se encontró que algunas estaciones de convergencia, colocadas en 1994, presentaban un claro fenómeno de *squeezing*; tal como se ilustra en la Fig. 5.

De acuerdo con esto se decidió realizar una simulación del proceso de fluencia de la zona de caverna utilizando el programa *FLAC 3D*; con la opción de *ubiquitous joint*. Las propieda-



■ [Foto 5].- Grietas en el hormigón proyectado colocado en 2007.



■ [Figura 5].- Evolución de las convergencias medidas entre 1994 y 1995 en las proximidades del tramo derrumbado.

des de los terrenos empleados en los cálculos se muestran en las Tablas 4, 5 y 6.

Terreno	RMR	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$m_i$	d
Limolitas	40	40	7	0
Areniscas	60	50	10	0

■ [TABLA IV].- Características resistentes en el terreno.

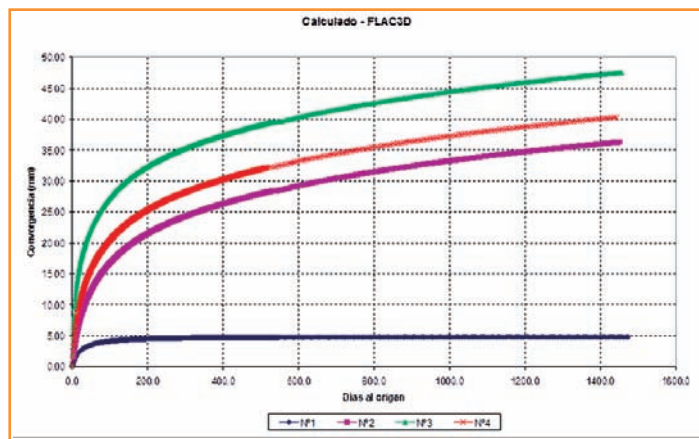
Terreno	Elásticas		Plásticas		$\gamma$ ( $t/m^3$ )
	E(MPa)	$\nu$	c(MPa)	$\phi$ (°)	
Limolitas	2400	0.2	0.5	34	2.6
Areniscas	9200	0.2	1.1	43	2.6

■ [TABLA V].- Propiedades elastoplásticas del macizo rocoso.

Tipo junta	Buzamiento	c ( $tm^3$ )	$\phi$
Juntas ubicuas	25°	5	28°
Fallas	90°	2	30°

■ [TABLA VI].- Características de las juntas.

Una vez realizada la simulación de la fluencia se obtuvieron las curvas de evolución de la convergencia, que se muestra en la Fig. 6.



■ [Fig. 6].- Convergencias calculadas en la modalidad de fluencia.

Si se comparan las curvas de la Fig. 6 con las realmente medidas, que están representadas en la Fig. 5, se comprueba que la parte de las curvas que corresponde al fenómeno de fluencia tienen pendientes similares, en ambos casos. Esto confirma que el fenómeno de *squeezing* modelizado representa bien el comportamiento del tramo del túnel en el que se formó la caverna.

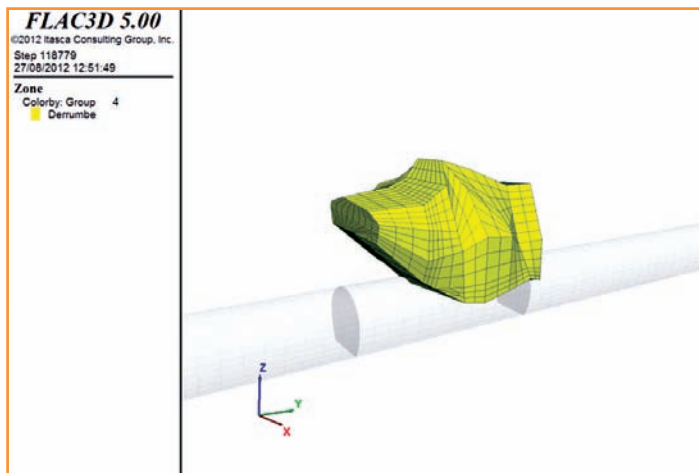
Para estabilizar la caverna y recuperar la forma del túnel se decidió reconstruir el tramo hundido de túnel construyendo un túnel artificial y rellenando el hueco de la caverna que quedaba sobre él.

La secuencia constructiva proyectada fue la siguiente:

- 1.- Refuerzo del soporte actual en dos tramos de túnel, uno antes de la caverna entre los P.K.3+505 y P.K.3+510 y otro después entre los P.K.3+530 y P.K.3+535.

- II.- Macizado de los tramos del Túnel contiguos a la caverna retirando la cuña inestable existente entre los P.K. 3+510 y P.K. 3+514.
- II.- Macizado de los paramentos del tramo hundido para poder colocar marcos con la forma del túnel y proyección de hormigón proyectado sobre la superficie del terreno saneada.
- III.- Colocación, en el tramo hundido, de marcos metálicos *HEB-160* a una distancia entre ejes de 1 m, forradas en el ala vista con chapas metálicas, tipo *Bernold*, y relleno del trasdós de los marcos contra el terreno con hormigón proyectado.
- IV.- Construcción de un arco de hormigón, *H-280*, sobre la bóveda de los marcos, con un espesor mínimo de 1 m.
- V.- Relleno del volumen de la caverna, situado sobre la corona de hormigón de 1 m de espesor, con mortero que tenga una resistencia mínima de  $50 \text{ kp/cm}^2$ .
- VI.- Inyección de lechada de cemento, a una presión inferior a  $3 \text{ kp/cm}^2$ , para colmatar los posibles huecos existentes entre el mortero de cemento y el terreno.
- VII.- Proyección de una capa de hormigón proyectado, de 20 cm de espesor, sobre los marcos y las chapas *Bernold* para reconstruir el perímetro del túnel.

Definida la solución se procedió a validarla mediante la resolución del modelo geomecánico tridimensional; que se muestra en la **Fig. 7**.



■ [Figura 7].- Volumen de la caverna modelizado.

En la **Fig. 8** se presenta la sección del modelo por la parte central de la caverna; que coincide bien con la mostrada en la **Fig. 3**.

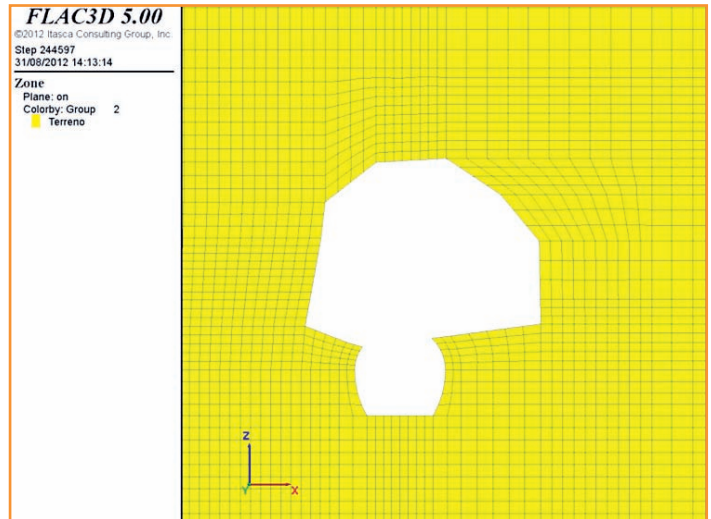
En la **Fig. 9** se muestran los elementos de soporte simulados en el modelo; que están constituidos por:

- Corona de hormigón *H-280*; de 1 m de espesor mínimo, detrás del extradós de la bóveda de los marcos.
- Marcos *HEB-160*.
- Relleno del resto de la caverna hundida con mortero, de  $40 \text{ Kp/cm}^2$  de resistencia mínima.

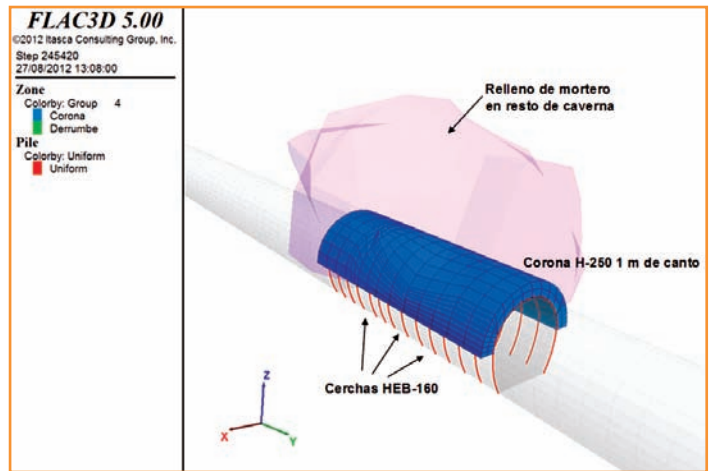
Los resultados de la simulación del refuerzo del soporte diseñado han permitido obtener la curva de convergencia del túnel en la zona de la caverna; desde su construcción en 1995 hasta el año 2030, incluyendo el derrumbe de 2007 y la reparación definitiva del 2013. **Fig. 10**.

En ella se comprueba que, tras generarse el hundimiento en el año 2007 se produce instantáneamente un incremento de la convergencia, bastante importante y, a continuación, la velocidad de convergencia se va amortiguando para entrar en la fase de deformación a velocidad constante; que, en el año 2012, tiene una velocidad de unas 3 micras/día.

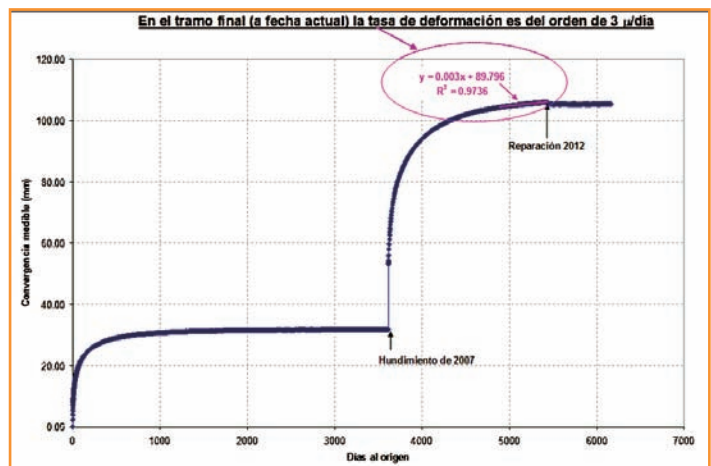
En esta figura también se aprecia el efecto de la reparación; pues tras realizarla las convergencias se paran drásticamente.



■ [Figura 8].- Sección transversal del modelo en el P.K.3+527.



■ [Figura 9].- Elementos de sostenimiento modernizados.



■ [Fig. 10].- Convergencia en el tramo de la caverna de 1995 a 2030.

## Trabajos de recuperación

*Senagua* adjudicó a la empresa china *Gezhoba Group Compay* el contrato para la reparación del *Túnel de Cerro Azul* y esta empresa lo subcontrató a *Fopeca* empresa ecuatoriana especialista en este tipo de trabajos.

La supervisión de la obra fue encargada a la empresa ecuatoriana *Cevaconsult Ltda*; que contó con la colaboración de *Geocontrol, S.A.*

Los trabajos de rehabilitación se iniciaron en octubre de 2012 y han finalizado en noviembre de 2013.

# Rehabilitación

Para iniciar los trabajos dentro del túnel fue preciso realizar trabajos de preparación en el exterior; como el acceso desde el canal, que se ilustra en la **Foto 6**.



[Foto 6].-  
Rampa de  
acceso a  
través del  
canal.

También fue preciso construir ataguías para impedir la entrada de agua al interior del túnel. La escasez de espacio en el interior del túnel hizo necesario una planificación detallada de las actividades a realizar, que se ordenaron de esta forma:

- 1º. Limpieza de los paramentos del túnel con agua a presión.
- 2º. Evacuación de los lodos creados con la limpieza.
- 3º. Refuerzos con bulones.
- 4º. Capa de hormigón proyectado.

La colocación de los bulones se hizo utilizando martillos perforadores neumáticos instalados en una plataforma de trabajo, montada sobre un camión; tal como se ilustra en la **Foto 7**.



[Foto 7].-  
Colocación  
de bulones.

La colocación del hormigón proyectado se realizó con dos robots de proyección; trabajando por vía húmeda, como se ilustra en la **Foto 8**.

Para trabajar en la rehabilitación de la caverna, además de los medios mencionados, se utilizó una plataforma elevadora para poder co-



[Foto 8].-  
Proyección  
de hormigón  
para  
sostenimiento.

locar las cerchas adecuadamente. En la **Foto 9** se ilustra el trabajo con la plataforma elevadora.



[Foto 9].-  
Trabajo en la  
caverna .

Las obras han estado supervisadas por medio de un Equipo Técnico que ha estado presente en la obra de forma permanente. Este equipo contaba con la presencia en la obra de un Ingeniero especializado en el control de la construcción de túneles; auxiliado diariamente por videoconferencia y periódicamente por la presencia de especialistas para resolver los problemas específicos que se presentaron.

Para realizar las obras se llevó a cabo una detallada planificación; cuya ejecución temporal fue supervisada con el máximo detalle para acortar el tiempo de la reparación, ya que estos trabajos suponían mantener fuera de servicio el trasvase Daule-Peripa.

No obstante lo anterior, hay que destacar que durante el año en que se han desarrollado los trabajos en tres ocasiones ha sido necesario parar los trabajos de rehabilitación para permitir el paso del agua a través del túnel, por motivos de desabastecimiento. En total los trabajos de rehabilitación han estado suspendidos durante cinco meses; lo cual representa el 41% del tiempo que ha durado la rehabilitación.

## Conclusión

Los datos disponibles sobre la construcción del Cerro Azul, finalizada en 1996, indicaban que su parte central ha estado sometida a un fenómeno de squeezing desde su construcción; que se considera la causa del derrumbe que se produjo en 2005.

De la inspección detallada del estado del túnel en 2012, resulta que se han apreciado daños en el sostenimiento del túnel en el 50,4% de su longitud y Fuertes problemas de corrosión en los bulones colocados en el 39,5% de su longitud.

Para recuperar la zona de la caverna se ha diseñado un procedimiento que consiste en reconstruir la estructura del túnel en el tramo derrumbado y en rellenar el hueco existente sobre esta estructura con hormigón y mortero.

La solución ha sido comprobada con el modelo 3D, puesto a punto para ajustar el fenómeno de squeezing, resultando que es totalmente efectiva para parar los movimientos de la caverna.

La reparación del túnel, que se inició en octubre de 2012, ha finalizado con éxito en el mes de noviembre de 2013.



### GEOCONTROL, S.A.

Cristóbal Bordiú 19-21, 5º • 28003 Madrid  
☎: +34 91 5531763 • Fax: +34 91 5549396  
E-mail: [geocontrol@geocontrol.es](mailto:geocontrol@geocontrol.es)  
Web: [www.geocontrol.es](http://www.geocontrol.es)