

ENSAYOS DE HIDROGATEO EN LA DETERMINACION DE LA LONGITUD DEL BLINDAJE DE UN TUNEL A PRESION CON BAJA COBERTURA

José Francisco Cervantes

Depto. Geología, Instituto Costarricense de Electricidad, Apdo. 10032, 1000
San José, Costa Rica

(Recibido 26/3/93, Aceptado 9/6/93)

ABSTRACT: For the final line design of a pressure tunnel some factors must be taken into account to ensure it during the operating life. It is necessary to get the geological excavation data, geomechanic parameters and details of the hydraulic operation. The tunnel will be lined with steel liner at the span where it has less cover and the rock mass strength is not enough to ensure an adequate in situ compressive stress to prevent hydraulic jacking. To identify this phenomena a hydraulic jacking test is used inside the underground opening to study its hydromechanic behavior. The Tunnel I of the Toro Hydroelectric Complex Project was excavated with little cover and the methodology explained above has been used which defined a length of 375 for the steel liner.

RESUMEN: El diseño del revestimiento final de un túnel a presión, debe de considerar los factores que aseguren la correcta operación de la obra durante su vida útil. Para esto es necesario de obtener el registro geológico de la excavación, sus parámetros geomecánicos, así como los detalles hidráulicos de operación. En sectores donde el túnel posee una baja cobertura y una presión de confinamiento endeble, insuficiente para soportar las presiones internas, el macizo rocoso se deformará a través de las discontinuidades, aumentando el flujo normal de agua y degradando el medio al mantener esta carga constantemente durante su operación, fenómeno denominado hidrogateo. Dada esta circunstancia el túnel deberá de revestirse con blindaje. Para identificar este fenómeno son usados los ensayos de inyección de agua dentro de perforaciones, para así determinar el comportamiento hidromecánico del macizo. Se presenta aquí el caso del Túnel I del Complejo Hidroeléctrico Toro I y II, el cual fue excavado con una baja cobertura y utilizando esta metodología, se definió una longitud de 375 m para la cual deberá usarse blindaje como revestimiento.

INTRODUCCION

Las tecnologías desarrolladas para el diseño del revestimiento de excavaciones subterráneas están orientadas a satisfacer la seguridad y la operación de la obra. En ellas se deben considerar todas las condiciones internas y externas que actúan directa o indirectamente en la funcionalidad de la misma. Para ello el registro geológico y los parámetros geotécnicos del medio son fundamentales en el diseño, comúnmente con los conceptos estructurales e hidráulicos de operación.

En túneles para conducción de agua es importante diferenciar entre túneles de conducción libre y a presión. Ambos deben ser analizados desde ángulos diferentes debido a las cargas hidráulicas a que estará sometido el segundo, por lo cual reviste de una importancia particular desde el punto de vista de diseño.

Los conceptos tomados en cuenta para el diseño de túneles a presión son la carga hidráulica interna, gradiente hidráulico, tipo de roca, permeabilidad, erodabilidad de la roca e hidrogateo. Este último fenómeno será tratado en este trabajo, con

base en los estudios desarrollados en el Túnel I Toro I del Proyecto Hidroeléctrico Toro I y II, localizado en la Provincia de Alajuela, al norte de Costa Rica (Fig 1).

Estos análisis forman parte integral de los diversos estudios que se han realizado para definir el diseño del revestimiento final del túnel y pretende caracterizar el comportamiento hidromecánico del macizo rocoso y determinar la longitud de túnel que deberá llevar blindaje como revestimiento, usando para esto, ensayos de hidrogateo en los sectores de baja cobertura.

CARACTERISTICAS DEL TUNEL

El Túnel I Toro I corresponde con la primera fase de conducción del Complejo Hidroeléctrico Toro, el cual tiene una longitud de 1058 m, una cobertura máxima de 62 m, con un tramo inicial de 80 m en que la cobertura es inferior a los 9 m y luego aumenta con una pendiente relativamente suave. La presión interna (carga hidráulica) será de 500 KPa y el objeto de este estudio es determinar la sección longitudinal en la cual el medio rocoso no es capaz de

soportar dicha presión, por lo que deberá reforzarse con un blindaje (Fig 2).

ENSAYO DE HIDROGATEO

Para determinar el comportamiento hidromecánico del macizo, es necesario inyectarle agua al medio a través de una perforación, usando bombas adecuadas y midiendo con bastante precisión la presión a la cual el agua es inyectada, el caudal y el tiempo de aplicación de la presión.

Se perfora dentro del túnel excavado un hueco de un diámetro el cual depende de las probabilidades del equipo, en nuestro caso usamos 5,56 cm (BQ) y se ensaya un tramo de 1,5 m ubicado a 6 m o más de la periferia, para que no esté influenciado por los procesos de excavación (Fig 3). Son aplicadas presiones por un periodo de 5 minutos, de 50 a 1000 KPa en orden ascendente y descendente, incrementándolas cada 50 unidades. Este proceso se realizó manualmente, debido a que no se contó con un equipo electrónico de mayor precisión. La capacidad de la bomba de agua es de 20 l/min y un manómetro con precisión de lectura cada 20 KPa.

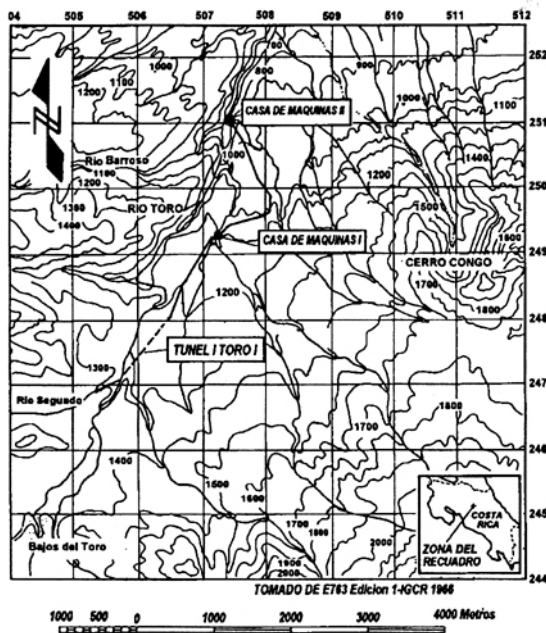


Fig. 1: Mapa de ubicación del Proyecto Hidroeléctrico Toro I, II y señalamiento del túnel en estudio.

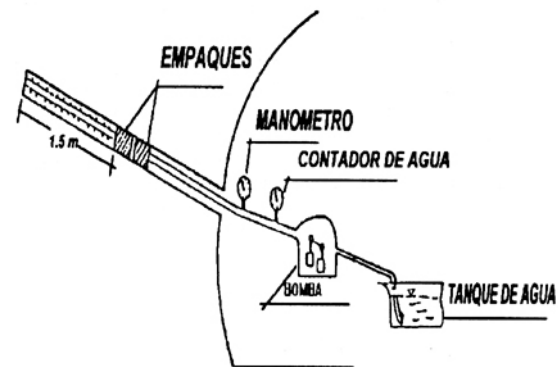


Fig. 2: Diagrama que muestra la disposición del equipo.

La escogencia del revestimiento de un túnel a presión depende de varios factores y éstos se proyectan desde las etapas iniciales de investiga-

ción, pero no es hasta que el túnel está excavado y las condiciones geológicas conocidas, para precisar el tipo de revestimiento más adecuado, siguiendo lineamientos que tiendan a optimizar el costo, ejecución y la vida útil de operación.

Tres factores básicos deben de considerarse en la selección del revestimiento:

- Pérdida aceptable de carga en la conducción.
- Prevención de pérdidas por infiltración y/o fracturamiento hidráulico.
- Asegurar la estabilidad del mismo por un periodo largo durante el llenado, operación y vaciado del túnel.

En este caso no se pretende llegar al estado último de resistencia de la roca, pero sí al fenómeno de hidrogateo, el cual ocurre en cualquier dirección donde la deformación del macizo rocoso se presenta por la falta de un adecuado esfuerzo compresivo "in situ", causado por el levantamiento vertical o gateo de estructuras tales como estratificación, apertura de fracturas y/o gateo de la masa rocosa lateralmente por baja cobertura en la cercanías de valles.

El estado de esfuerzos "in situ" puede ser medido por diferentes métodos de difícil ejecución, sin embargo el ensayo de hidrogateo practicado en perforaciones se utiliza para obtener una medida del esfuerzo principal mínimo en un macizo rocoso (Benson, 1988). Este ensayo se ejecuta dentro de una excavación, debiéndose realizar a una distancia de 1,5 a 2,0 veces el diámetro del túnel, para asegurarse que los resultados no sean afectados por los procesos de excavado y la descompresión desarrollada en la periferia del túnel. Cuando se ejecuta un ensayo de hidrogateo, se simulan los efectos que se impondrán en la roca por el túnel a presión. Es importante también que la perforación corte o atraviese todos los sistemas de fracturas y/o planos de discontinuidad (estratificación, etc).

En túneles de baja cobertura, se estima que el esfuerzo principal mínimo corresponde con la carga vertical, sin embargo, pueden estar también influidos por la presencia de zonas de cizalla (fallas) con módulos de deformación bajos u otros efectos estructurales no perceptibles (anticlinales, sinclinales, etc.).

Un criterio tradicional usado en muchas regiones del mundo para el cálculo del espesor de

roca arriba del túnel, necesario para vencer estos fenómenos, está dado por la siguiente ecuación (en Benson, 1988):

$$H_r = \frac{1.3 H_w - H_s \partial_s}{\partial_r} \quad (1)$$

H_r = espesor de la roca arriba del túnel

∂_r = densidad de la roca

H_s = espesor de suelo arriba del túnel

∂_s = densidad del suelo

H_w = carga máxima estática

Esta ecuación provee un factor de seguridad de 1,3. El análisis de hidrogateo permitirá comparar los resultados y finalmente definir la longitud necesaria del blindaje.

GEOLOGIA LOCAL Y CARACTERISTICAS GEOTECNICAS

Los materiales que afloran en el área del túnel se inician con suelos, cenizas y piroclastos que tienen un espesor de 8 a 18 m. En general se comportan mecánicamente similar, con valores de SPT de 3 golpes, humedades naturales superiores al 160%, una densidad húmeda promedio de 11 KN/m³ y velocidades sísmicas de 300 - 400 m/s (Estrada, 1991). El nivel freático se ubica entre los 12 y 18 m de la superficie del terreno hacia abajo (Fig 3).

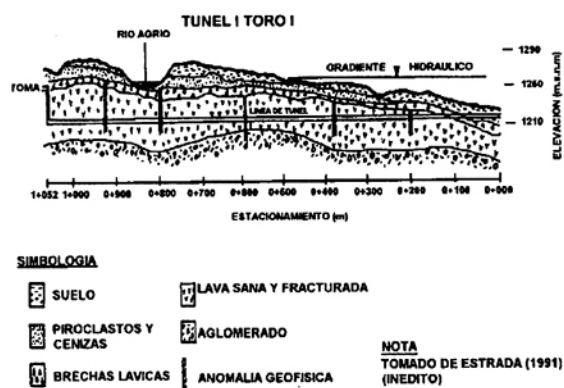


Fig. 3: Perfil geológico del túnel en estudio.

Subyace a los suelos una lava brechosa, que en su parte superior se presenta como una capa de brecha de espesor variable, constituida por bloques de lava ligeramente alterados, embebidos en una matriz limo-arcillosa a areno-limosa. Hacia el piso se presenta una lava brechosa bastante compacta, de coloración variable. Las velocidades sísmicas son de 600-1200 m/seg, dan una recuperación de 40-80%, un RQD de 10-20% y una densidad seca promedio de 22 KN/m^3 . El espesor promedio de esta unidad es de 10 m.

Debajo de las brechas y constituyendo el sustrato donde se excavó el túnel, se presentan lavas de buena condición física y mecánica. Tienen una velocidad sísmica de 3300-4000 m/seg, resistencia a la compresión simple de 100-300 MPa, permeabilidades de $10^{-3} - 10^{-6}$ cm/seg, recuperación en las perforaciones de 90-100%, RQD de 60-80% y una densidad seca promedio de 26 KN/m^3 . El espesor total de la lava es de 40 m.

Varias anomalías geofísicas fueron determinadas durante el periodo investigativo de factibilidad (Fig 3), que de acuerdo con los resultados de la excavación, corresponden en su mayoría con sectores de alto fracturamiento, excepto la anomalía bajo la estación 0 + 367 la cual se relaciona con una zona de falla de 5 m de espesor.

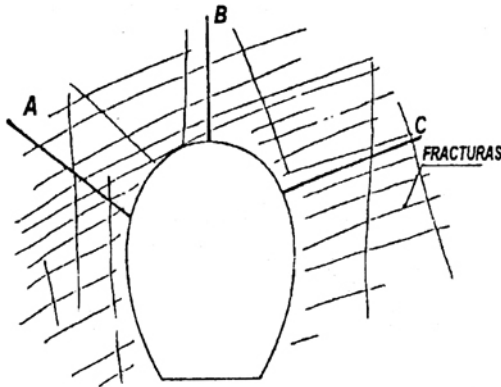


Fig. 4: Distribución geométrica de las principales familias de diaclasas que aparecen en este sector del túnel.

A: ángulo favorable para la ejecución de la prueba.
B: medianamente favorable
C: desfavorable.

ANÁLISIS DEL FRACTURAMIENTO

El Túnel I Toro I fue excavado a través de lavas masivas con fracturamiento de moderado a alto y por lo expuesto en el apartado II, el fenómeno de hidrogateo puede manifestarse dentro de ellas, representada por la apertura de las diaclasas, aumentando el valor natural de absorción de agua y poniendo bajo amenaza la estabilidad de la excavación, de allí que es importante definir la disposición principal de las fracturas y ejecutar los ensayos respectivos en la dirección adecuada (Fig 4).

En un análisis de concentración de fracturas, basado en mediciones dentro de la excavación entre las estaciones 0+200 a 0+500, fueron determinadas las siguientes familias (Fig 5):

- 1- $167^\circ/71^\circ$
- 2- $101^\circ/63^\circ$
- 3- $096^\circ/13^\circ$

Esto permite definir la dirección más adecuada para realizar los ensayos (Fig 6), la cual debe atravesar los tres grupos de diaclasas ($120^\circ/45^\circ$).

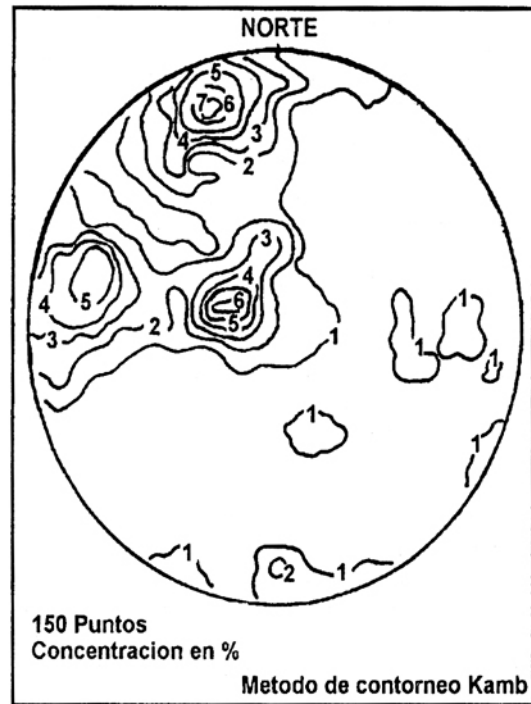


Fig. 5: Diagrama de frecuencia que muestra la distribución de las diaclasas, con 3 familias predominantes, $167^\circ/71^\circ$,

El patrón de fracturamiento varía ligeramente en dirección hacia aguas arriba del túnel, sin embargo, no tiene injerencia sobre el fenómeno tratado, pues se cuenta con mayor cobertura, excepto el sector bajo el río Agrio, con la ventaja de que en este tramo el fracturamiento disminuye considerablemente.

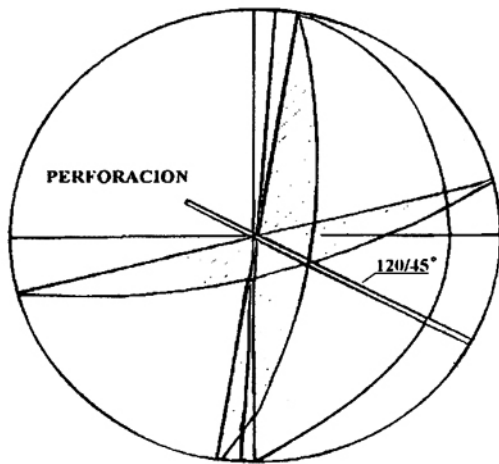


Fig. 6: Suelos y piroclastos son considerados como una misma unidad.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE HIDROGATEO

Teniendo en cuenta todos los aspectos mencionados en los capítulos anteriores, se ha desarrollado un programa de perforaciones y ensayos de hidrogateo en sectores que poseen baja cobertura vertical y que eventualmente deberán llevar un tratamiento especial de revestimiento. Tales sectores son descritos en el cuadro 1.

Los ensayos fueron realizados de tal forma que se registrara cada detalle durante su ejecución, pues no se pudo contar con un equipo electrónico adecuado. No obstante los resultados han sido satisfactorios.

El comportamiento hidromecánico para la mayoría de los sectores fue similar, caracterizado por una absorción lineal en su primera fase, correspondiente con la permeabilidad natural del medio, seguida por una dilatación de las fracturas de forma exponencial, dada la presión que permite la apertura de estas venciendo el esfuerzo de confinamiento, denominado *fenómeno de hidrogateo* (Figs. 7 - 18). En algunos de los casos este comportamiento es muy evidente, debido principalmente a las características del medio donde fue ejecutada la prueba, ya sea por el grado de fracturamiento así como la apertura, relleno y cementación de las fracturas, las cuales condicionan en gran forma la transmisión del fenómeno.

Cuadro 1

Características del medio donde son ejecutados los ensayos

ESTACION (m)	CARGA EFECTIVA POR COBERTURA (kPa)	PRESION DE RECHAZO (P. PIEZOMETRICA) (kPa)	RQD %	FRACTURAS N°	CARACTER
0 + 224	301,3	150	58	12	abiertas
0 + 263	205,9	225	61-90	10	"
0 + 300	308,5	200	70	12	"
0 + 320	406,2	200	47-58	14	"
0 + 340	406,4	150	72-92	12	cerradas
0 + 369	409,6	150	46-88	6	abiertas
0 + 390	500,2	150	31	16	"
0 + 418	500,7	200	60-70	13	"
0 + 490	505,2	250	50	15	"
0 + 815	407,3	100	63-71	4	cerradas
0 + 830	407,9	250	58-84	5	"

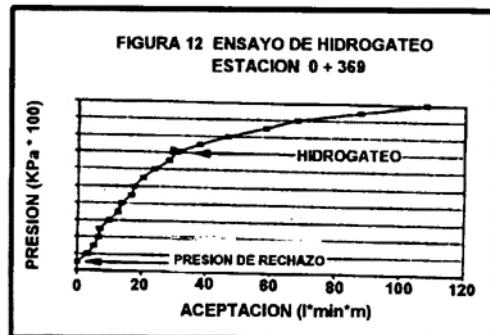
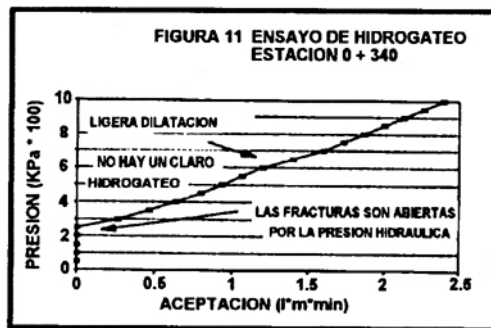
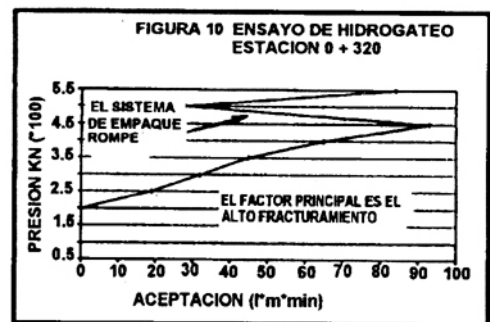
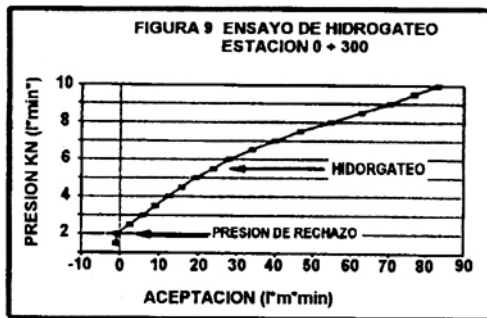
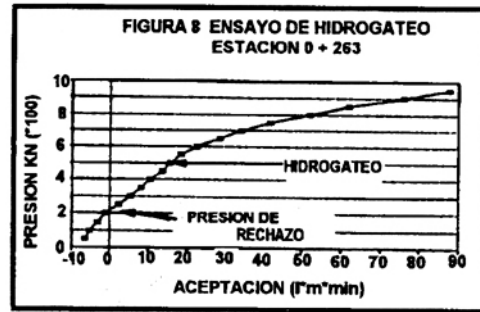
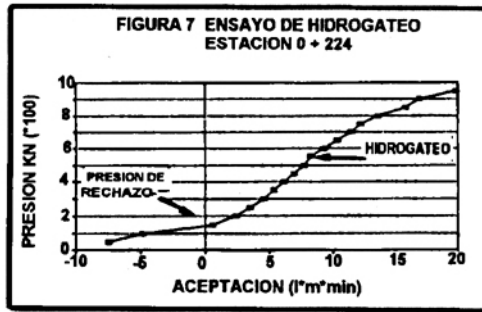
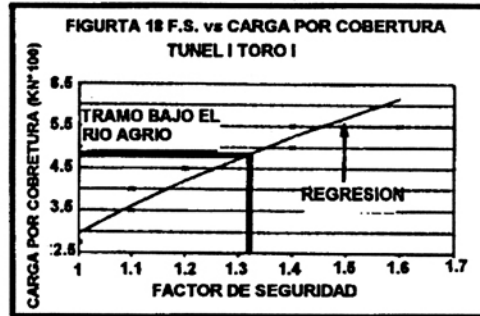
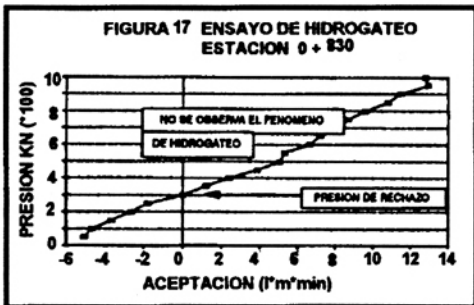
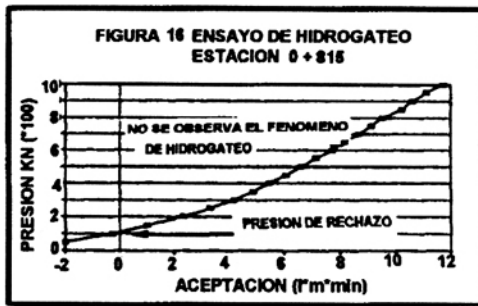
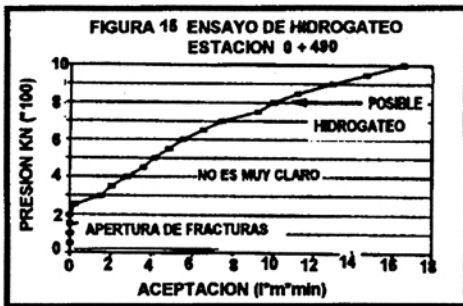
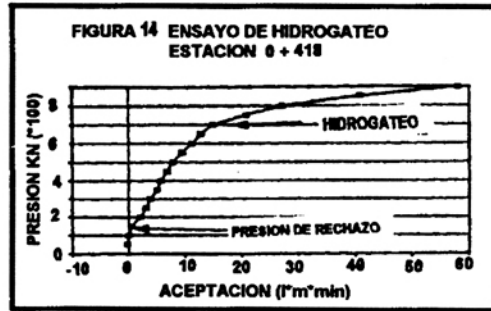
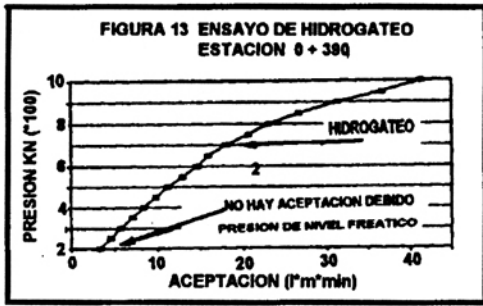


Fig. 7: Suelos y piroclastos son considerados como una misma unidad.

Existen ensayos que no muestran fielmente el proceso que aquí se describe, por ejemplo los ejecutados en las estaciones 0+320, 0+340, 0+815 y 0+830. El primer caso (0+320), se presenta para mostrar que en situaciones en que la roca posee un muy alto fracturamiento, la ejecución de la prueba se torna difícil, pues la influencia de la excavación afectará de forma directa el ensayo y el agua in-

yectada se filtrará directamente en ella, produciéndose en la mayoría de los casos la ruptura del sistema de inyección. No obstante, su resultado no tiene relevancia para la interpretación final.

Para las estaciones 0+340, 0+815 y 0+830, el fenómeno de hidrogateo no se manifiesta debido a la falta de conexión estructural de las fracturas dentro del macizo rocoso, a la buena condición



Figs. 13 a 18:

física de la roca, al escaso fracturamiento y/o las pocas fracturas que aparecen son cerradas. Estas características condicionan el resultado, permitiendo que la roca se comporte de manera aislada en forma de roca intacta y no como un macizo rocoso fracturado y heterogéneo. Considerando esta limitante, es posible extrapolar de los resultados finales, suponiendo por supuesto una continuidad

de los condiciones geológico-geotécnicas y obtener una definición del estado de esfuerzo mínimo en este sector.

El cuadro 2 resume los resultados de los ensayos, además se efectúa una comparación con la carga efectiva por cobertura y se calcula un factor de seguridad (F.S.), en cada uno de ellos, usando una presión interna estática del túnel de 500 KPa.

Cuadro 2

Resultados de los ensayos de hidrogateo

ESTACION (m)	PRESION DE HIDROGATEO (kPa) *	F.S.	RELACION I (kPa)	PROPORCION CARGA POR COBERTURA / RELACION I
0 + 224	550	1,1	400	0,78
0 + 263	500	1,1	275	0,94
0 + 300	550	1,1	350	0,77
0 + 320	---	---	---	---
0 + 340	---	---	---	---
0 + 369	700	1,4	550	0,90
0 + 390	700	1,4	550	0,91
0 + 418	700	1,4	500	1,01
0 + 490	800	1,6	550	1,00
0 + 815	---	---	---	---
0 + 830	---	---	---	---

* Presión obtenida en el ensayo.

** Relación obtenida restando a la presión de hidrogateo la presión piezométrica (p.rechazo), medida en el sitio.

La Relación I se obtiene de la diferencia entre la presión de hidrogateo y la presión piezométrica (presión de rechazo), medida en el sitio, el propósito es obtener la proporción expresada en la última columna del cuadro 2, para determinar si el esfuerzo principal mínimo obtenido por el ensayo de hidrogateo, corresponde con la carga efectiva por cobertura. Este concepto sería real si no existen estructuras geológicas importantes en el sector del túnel, dejando a un lado la topografía, pues es relativamente suave, para que afecten o modifiquen dicho modelo. De acuerdo con estos valores (los cuales, en general, son cercanos a 1), afirman que la premisa inicial considerada es verdadera y que el esfuerzo principal mínimo está regido por la cobertura. Las pequeñas diferencias se le adjudican a la precisión de la instrumentación, a los valores promedios de densidad y principalmente al espesor de cada material arriba del túnel.

LONGITUD DEL BLINDAJE

Los resultados anteriores permiten establecer el o los sectores que serán necesario colocar blindaje como revestimiento. Definiendo para ello que el factor de seguridad debe estar situado en un valor inferior a 1,3, este llegaría no más allá de la estación 0+369, donde F.S. es de 1,4, no obstante

los ensayos en los sectores anteriores no fueron concluyentes, así que inclinándonos por la protección del medio, dicha estación parece conveniente. Por otra parte, aspectos adicionales de índole geológico señalan una estructura de falla en la estación 0+367, por lo que es recomendable desplazar este blindaje unos metros más para asegurar que no exista una influencia directa de esta zona de debilidad, así pues una longitud de 375 m para el blindaje y una transición posterior del revestimiento favorecerá la seguridad de la obra.

Otro aspecto es la situación del revestimiento del tramo bajo el río Agrío, donde los resultados del ensayo no permiten definirlo con propiedad. Sin embargo, es posible deducirlo de la carga por cobertura, manteniendo la premisa de que cumple con la definición del esfuerzo principal mínimo. Según esto y la figura 18², el factor de seguridad en este sector es ligeramente mayor de 1,3, por lo que el uso de blindaje no es necesario, además las condiciones geológico-geotécnicas de la roca son excelentes, lo cual asegura que el fenómeno de hidrogateo no se presente.

2 La gráfica 13 se define por una regresión exponencial del tipo
 $Y = A * e^{B*x}$
 $A = 0,67$
 $B = 0,15$

Se puede comparar el criterio tradicional, expuesto en el apartado II, ecuación (1), con el criterio de hidrogateo, sustituyendo con valores promedio de roca y suelo¹ del apartado III, se obtiene entonces que H_r deberá ser mayor o igual a 20 m. Esto significa que para cumplir con un factor de seguridad mínimo de 1.3, la longitud del blindaje por este modelo sería de 300 m (estación 0+300, según Fig 3), lo cual es menor al que fuera obtenido con los ensayos "in situ", que indica que la obra estaría amenazada de sufrir una falla por las presiones internas que no tendrían una respuesta adecuada del medio rocoso.

Estos resultados dan una luz importante hacia los futuros análisis de diseño del revestimiento, los cuales contarán con una técnica fácil de ejecutar, hasta cierto punto conservadora y que determina el comportamiento hidromecánico del macizo, que redundará obviamente en la seguridad y operación de la obra.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los ensayos de hidrogateo son útiles en túneles de baja cobertura como el Túnel I de Toro I. Estos deben de ejecutarse considerando las estructuras geológicas tales como estratificación, fallas y fracturas en general, además de relleno, apertura y grado de cementación. La disposición e intensidad de estos factores definitivamente controlan el resultado del ensayo y por ende el comportamiento hidromecánico del macizo rocoso bajo estas condiciones.
2. Para el caso analizado en este trabajo el fenómeno de hidrogateo se manifiesta en el medio rocoso fracturado, dilatando las fracturas produciendo una aceptación del fluido mayor a la natural y amenazando la estabilidad de la obra.
3. Los resultados muestran la relación directa que existe entre la carga efectiva por cobertura y el esfuerzo principal mínimo del medio.
4. Con los factores de seguridad obtenidos de los ensayos, se define una longitud no mayor de 369 m de blindaje necesario para proteger la obra, aunque podría ampliarse a los 375 m con el propósito de cubrir la zona de debilidad producto de una falla geológica, cerca de los linderos de este revestimiento.
5. Bajo el paso del río Agrio los resultados no son concluyentes. Sin embargo, extrapolando los análisis y considerando la calidad de la roca, se concluye que un blindaje no es necesario.
6. Para evaluar la necesidad o no de blindaje en un túnel a presión, se debe de contar entre otros parámetros, con ensayos de hidrogateo como norma, pues queda demostrado que el criterio de espesor de roca, subestima la longitud de éste.
7. Es conveniente gozar de un buen control de calidad durante la ejecución de la prueba.
8. Para obtener mejores resultados, es indispensable contar con un equipo electrónico que registre todos los detalles de la prueba.

BIBLIOGRAFIA

- BENSON, R.P., 1988: Design of unlined and lined pressure Tunnels. - International Symposium on Tunnelling for Water Resources and Power Projects, New Delhi, India.
- ESTRADA J., 1991: Informe de las Condiciones Geológico-Geotécnicas en el Túnel de Conducción del Proyecto Hidroeléctrico Toro I. - Oficina Geología de Proyectos y Oficina de Geofísica, Dpto de Geología (inédito).