Problemas de Construcción en el Túnel Nº 2 del Acueducto Río Colorado-Tijuana, Baja California Norte

Salazar Castro, Carlos y Veytia Barba, Mario**

ACUEDUCTO RIO COLORADO-TIJUANA

La Ciudad de Tijuana ha tenido graves problemas por el escaso abastecimiento de agua potable. El principal factor de esta deficiencia lo constituye el gran incremento de su población, que en 1960 era de 165,000 habitantes, en 1975 llegó a 550,000 y se estima para 1980 en 730,000 habitantes.

Las fuentes de abastecimiento con que cuenta actualmente son:

- La planta desaladora Rosarito, que aporta 300 l/s.
- Pozos del Valle de la Misión, 200 l/s.
- Pozos aledaños de la Ciudad, 300 l/s.
- Las conducciones contratadas con E.U. a través de las instalaciones del Sur de California, 300 l/s.

El suministro de estas fuentes con un total de 1,100 l/s, precariamente alcanza para satisfacer las necesidades de 600,000 habitantes. Esta escasez en el suministro establece un obstáculo al avance socio-económico general de la región.

Para resolver este problema, el Gobierno Federal procedió a estudiar las posibilidades de nuevos aportes, decidiendo finalmente la conveniencia de hacer llegar el agua desde el Río Colorado.

El proyecto consideró dos etapas. La primera actualmente en construcción, se proyectó con una capacidad de 4.0 m³/s. para una población de 1'200,000 habitantes. La segunda considera una capacidad de 5.0 m³/s.

La construcción de la primera etapa se inició en Enero de 1975.

DESCRIPCION DEL PROYECTO

Captación.

El agua se captará del Canal Reforma, del Distrito de Riego No. 14. El conjunto de obras para la toma, se ubica a 15 km. al poniente de la Ciudad de Mexicali. Consta de tres tanques revestidos de concreto con una capacidad conjunta de 86 400 m³, interconectados con sifones y que mediante estructuras de control, puede verter sus excedencias a un dren.

A lo largo de la conducción se construyen seis plantas de bombeo, con las cuales se vencerá una altura de 1,137 m. y las pérdidas de carga en la tubería.

Conducción.

La línea de conducción tiene un desarrollo de 123 km. entre la planta de captación y la planta potabilizadora.

* Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Los tramos de tubería con presiones inferiores a 22 kg/cm², se construyeron de concreto preesforzado con diámetros que varían de 137 a 183 cm., para cruzar zonas planas o de lomerío suave. En algunos tramos de la zona montañosa, se producirán fuertes presiones con cargas hidráulicas hasta 350 m. En estas partes la tubería está formada de tubos de acero, con espesores de 8 hasta 22 mm.

Túneles.

Para cruzar la zona montañosa de la Rumorosa, fué necesario construir dos túneles con longitudes de 6,950 y 3,950 m.

Originalmente se habían proyectado tres túneles, pero el túnel No. 1 se suprimió, sustituyéndolo por una conducción entubada que rodea la ladera. Para evitar confusiones se conservaron las denominaciones a los túneles en construcción, que son: Túnel No. 2, para el Túnel de 6,950 m. y Túnel No. 3, para el de 3,950 m.

A continuación haremos una descripción somera de la geología general de la región y posteriormente, examinaremos con detalle, las formaciones que atravesó el Túnel No. 2, para correlacionarla con el comportamiento de la maquinaria que se empleó en la excavación del Túnel y los rendimientos que se obtuvieron.

GEOLOGIA GENERAL

La zona en estudio se encuentra localizada dentro de la provincia geotectónica del Batolito de California, cuya mayor expresión se observa en la Alta California, E.U.A. El Batolito parece que empezó a generarse en la Era Mesozoica, dentro de un gran sinclinorio, formando un extenso basamento. En el caso de La Rumorosa, el basamento está constituido principalmente por granodiorita, encima de la cual se encuentra una serie de esquistos del Paleozoico fuertemente foliados aunque levemente plegados. El rumbo general de los estratos es NE-60°SW con echados predominantemente al norte, de 70°, pero en ocasiones es variable y puede volverse al sur. Tanto el basamento de granodiorita como los esquistos, han sido intrusionados por granitos más jóvenes, posiblemente de la Era Cenozoica. Estas nuevas intrusiones plutónicas se emplazaron a lo largo de Fallas Maestras, de tipo tectónico profundo, con rumbo general NW-SE.

El intrusivo o plutón de La Rumorosa proyecta numerosos apófisis dentro de los esquistos, y en las cercanías de contacto abundan inyecciones de granitos en forma de diques y diquestratos. En ciertos lugares, también cercanos al contacto, pueden

observarse múltiples inyecciones de granito en forma de capas muy delgadas alternando con estratos de esquisto.

Como última fase magmática del emplazamiento granítico, se encuentran en la región numerosos diques de pegmatita, concentrados principalmente en zonas probablemente debilitadas por esfuerzo cortante. Los diques son abundantes en los esquistos, pero también intrusionan al basamento y al propio granito.

GEOLOGIA EN EL TRAZO DEL TUNEL No. 2

El marco geológico está constituido por un complejo metamórfico, formado por una serie de Esquistos y Gneiss con intrusiones de apófisis graníticas, diques y retículas de pegmatita y vetas de cuarzo.

No existen características definidas para una separación clara entre Esquistos y Gneiss, razón por la cual en adelante llamaremos a esta formación "Serie Esquistos Gneiss".

La serie está constituida por capas delgadas, observándose facies de micaesquisto, cuarcita, metacuarcita y aún algunas capas formadas enteramente de mica negra o biotita y de mica blanca (muscovita). Las micas se encuentran preferentemente en bandas paralelas que le imprimen el carácter foliado a las rocas. La proporción de las micas llega hasta el 40 y 500/o.

EXCAVACION DEL TUNEL No. 2 CON LA MAQUINA TOPO

Para la excavación de los túneles, originalmente se eligió un procedimiento nuevo en México, utilizando una máquina perforadora (Topo) que elimina el uso de explosivos. Esta máquina era "Jarva" Modelo Mark 12, capaz de perforar con diámetro de 3.6 m., y con un equipo adicional pueden colocarse dovelas precoladas de concreto, con lo que se logra el revestimiento definitivo en forma simultánea a la excavación.

El principio bajo el cual opera esta clase de máquinas, es el de que los cortadores, transmiten al terreno una carga que debe ser superior al esfuerzo de ruptura del material. Básicamente, la máquina Topo consiste en un cuerpo metálico, cilíndrico, que se apoya en las paredes de la excavación, por medio de patas de atraque, provista de planchas con puntas semiesféricas. Las paredes de la excavación deben tener suficiente capacidad de carga para soportar el empuje de las planchas, y además de requerir determinado grado de rugosidad, deben

dejarse penetrar por las puntas semiesféricas para lograr mayor fricción.

El corte del material lo efectúan una cabeza giratoria, con un número variable de cortadores troncocónicos, que a su vez giran sobre su propio eje. El diseño de los cortadores también es variable.

El producto del corte, o sea la rezaga, se levanta del piso por medio de cangilones que tiene la cabeza cortadora, y se deposita en una banda transportadora que la conduce a las vagonetas o camiones colocados atras del Topo.

Se esperaba que aplicando estas técnicas, y con la máquina que se mencionó, se obtendría un avance de 1.5 a 1.8 m. por hora de trabajo.

El Túnel No. 2, se comenzó a excavar por un solo extremo, a partir del portal de salida; el día 2 de agosto de 1975, con excavadora Topo.

La información obtenida de fabricantes y de consultores no correspondió a la realidad, y los resultados obtenidos con el empleo de este equipo

fueron insatisfactorios, pues en 10 meses de operación, únicamente se lograron 840 m. de avance.

Ante el fracaso de este método de perforación, se decidió continuar la excavación aplicando los procedimientos tradicionales de barrenación, con voladura controlada para evitar al máximo las sobre-excavaciones, previendo un adecuado sistema de soporte por medio de anclas y mallas en los tramos en que se requirió, y colocando en los túneles el revestimiento acostumbrado de concreto.

FACTORES GEOLOGICOS DEL BAJO RENDIMIENTO

Se consideró la conveniencia de efectuar un estudio de los factores geológicos que pudieron influir en el bajo rendimiento de la máquina llamada "Topo".

En el estudio realizado, se estima que los factores geológicos determinantes, de ese resultado inadecuado fueron:

Fig. 2.— Perforadora Topo Mark 12.

- 1.— Las características petrográficas de la roca.
- 2.— Las características físicas de la roca.
- 3.— Las propiedades mecánicas de la masa rocosa.
- 4.— Anomalías geológicas.

Características Petrográficas.

La fábrica, o sea la forma de agrupamiento de los minerales, tiene gran influencia en el comportamiento físico de las rocas. La mica, mineral determinante en este caso, tiene la propiedad de separarse en hojas muy delgadas, debido a que tiene un crucero basal perfecto, lo cual, junto con la presencia de planos de deslizamiento hacia que sea un mineral "resbaladizo".

Esta propiedad incluyó grandemente en la baja eficiencia del equipo, debido a que el Topo, para poder atacar, necesita apoyarse en sus patas de atraque, que se sostienen contra las paredes del Túnel por fricción de la placa y por penetración de las puntas semiesféricas de la misma placa. Siempre que la presión de empuje de la cabeza cortadora llegaba a un cierto límite, se resbalaban las placas y se aflojaba el topo. En estas condiciones, había necesidad de maniobrar muchas veces la máquina, lo cual se traducía en pérdida de tiempo y pérdida de alineamiento.

Por esta razón, nunca se llegó a alcanzar el máximo de la carrera de la flecha que es de 2 pies (61 cm.) El número de empujones siempre fué muy grande y el avance promedio por empujón, en todo el tramo, fué solamente de 27 cm.

Por lo que se refiere a la resistencia a la penetración, teniendo las micas un módulo elástico, mucho más bajo que el cuarzo y los feldespatos, se deforma considerablemente antes de romperse, y la energía aplicada por los cortadores, se consumía en la deformación transformándose en calor y causando trastornos en los sistemas de lubricación de los cortadores.

Características Físicas de la Roca.

Se realizaron pruebas de laboratorio en ejemplares de rocas provenientes de los sondeos de exploración, procurándose escoger ejemplares representativos de las diferentes clases de rocas encontradas.

En los laboratorios además de determinarse la densidad de las muestras, se efectuaron pruebas de compresión simple, de compresión simple con carga y descarga, y pruebas triaxiales. En los labo-

ratorios de prueba de material de la Gerencia, ubicados en Tecate, B.C.N., se determinó dureza "Shore", esto es, prueba de rebote y también se hicieron análisis granulométricos de la rezaga producida por la máquina Topo.

Propiedades Mecánicas de la Masa Rocosa.

Un aspecto importante para el avance del Topo, es el grado de fracturamiento que presentaba la masa rocosa, o sea el R.Q.D. (Rock Quality Designation) que es un factor numérico que indica el porciento de fragmentos de un tamaño determinado, por unidad de longitud, también determinada, la magnitud de las unidades puede variar según el caso, pero el factor numérico R.Q.D. es inversamente proporcional al grado de fracturamiento, es decir, a mayor fracturamiento, menor R.Q.D. El rendimiento del Topo depende de la dureza, abrasividad, esfuerzo de ruptura y R.Q.D. del material.

La siguiente tabla, tomada de U. Deere, proporciona una designación ingenieril para una masa rocosa, respecto al espaciamiento de las juntas o fracturas:

TERMINO

I.— Muy cerrado	Menos de 5 cm.
II.— Cerrado	De 5 a 30 cm.
III.— Moderadamente cerrado	De 30 cm. a 1.0 m
IV.— Abierto	De 1.0 a 3.0 m.
V.— Muy Abierto	Mayor de 3.0 m.

La eficacia de la rezaga, depende totalmente del tamaño máximo que pueden levantar los cangilones; cuando el tamaño de los fragmentos que caen, es mayor del que pueden levantar los cangilones, la cabeza cortadora se atasca y es necesario parar la máquina para remover a mano el obstáculo y arreglar los desperfectos.

Esta situación se presentó con frecuencia en el Túnel No. 2, en las cercanías de las zonas de contacto.

En el caso del Túnel No. 2, tenemos que el Esquisto Gneiss varía de alta a muy alta resistencia, en tanto que los intrusivos graníticos y pegaméticas, son de resistencia media.

ANOMALIAS GEOLOGICAS

Las fallas que aparecieron en el Túnel, eran fallas de compresión que no afectaron notablemente el avance de la máquina, debido a su poca amplitud y a la competencia del terreno; en cambio las filtra-

ciones, si fueron un factor de retraso, no tanto por la operación misma del bombeo, sino por la granulometría de la rezaga, con altos contenidos de material fino, el cual con el agua formaba un fluido lodoso que no se podía sostener sobre la banda y se derramaba y se amontonaba en el frente; este material tenía que traspalearse a mano con la consiguiente pérdida de tiempo y eficiencia. Esta condición se muestra con claridad en la gráfica del Anexo 3, donde se muestra la disminución del avance, a partir de la estación 0+700 donde comenzaron las primeras filtraciones.

EXCAVACION DEL TUNEL No. 2, CON METODOS TRADICIONALES.

El día 11 de agosto de 1976, se iniciaron los trabajos de excavación utilizando el método convencional con explosivos. Esta vez, se inició también la excavación a partir del Portal de Entrada (Frente 1).

En el Portal de Salida (ahora Frente 2) se comenzó a progresar el avance con los métodos tradicionales.

AVANCE EN AMBOS FRENTES EL 31 DE OCTUBRE DE 1977.

Frente 1.

Este frente tenía en la fecha señalada una longitud de 1.671 m.

Hasta la estación 0 + 834 se atravesó la sección de granodiorita. En este tramo deterioraron y aflojaron los huacales de madera de los marcos, empezando a desprenderse algunas plegaduras.

A partir de este cadenamiento, el terreno cambió a rocas de transición, principalmente migmatitas con inyecciones de gneiss, que se comportaron en forma muy competente, lográndose muy buenos avances. En este frente es donde se logró el máximo avance mensual de todo el Túnel, con 229 m., que representaba un promedio de 8.9 m. por día trabajado. El tramo en buenas condiciones, con solo un lugar ademado, llegó hasta la estación 1 + 350 aproximadamente; es una zona con numerosos apófisis y diques de granito pegmatítico, bastante fracturada y con abundantes filtraciones de agua a presión. En este tramo hubo necesidad de colocar ademe en 10 lugares distintos; esta zona se prolongó hasta el frente actual.

El gasto bombeado que salía por el portal, se midió en una estación con vertedor fijo. El vertedor empezó a funcionar el mes de julio y ha regis-

trado un máximo de 139 l/s. en el mes de septiembre, cuando se tuvieron filtraciones que llegaron a inundar el frente de dos ocasiones. El promedio de gasto bombeado fué de unos 110 l/s.

Frente 2.

Este frente alcanzó el 31 de octubre de 1977, una longitud de 2,337 m., incluyendo los 840 m. del topo. En este frente se tuvieron problemas de flujo de agua entre las estaciones 1 + 500 y 1 + 650, en los que se manejaron volúmenes hasta de 300 l/s., bombeándolos con tubería de descarga de 16 pulgadas, hacia afuera del Túnel.

La serie de cuarcita y metacuarcita que se venían presentando, se terminó aproximadamente en la estación 2 + 300, en donde apareció nuevamente la serie Esquisto—Gneiss.

En las estaciones 1 + 900, 2 + 000 y 2 + 200, se presentaron apófisis graníticas fuertemente fracturadas y acompañados de filtraciones, sobre todo en la 2 + 000 en donde se llegó a inundar el frente. Por esta razón en este tramo se tuvo poco avance.

CONCLUSIONES

La operación efectiva de la Máquina "TOPO", quedó muy por abajo de lo que se esperaba de ella, debido principalmente, a determinados factores geológicos, desfavorables, que a continuación se indican:

1).— Características petrográficas de la roca.— Asociación mineralógica constituida por cuarzo, (58% en los esquistos y hasta 90% en la metacuarcita) y mica, tanto biotita, como muscovita, que varían de 20% hasta 40%. El cuarzo hace que la roca sea muy abrasiva, y la "fábrica" o arreglo de los minerales, hace que la roca sea tenaz, y como la mica tiene un bajo módulo elástico, el mineral se deforma mucho antes de romperse, con lo cual, gran parte de la energía se consume en la deformación, generando excesivo calor, que causa serios trastornos en los sistemas de lubricación de los cortadores. Por otro lado, la mica obra también como lubricante en las paredes de la excavación, haciendo resbalar las patas por falta de fricción, aflojándose continuamente el apoyo de la máquina.

2).— Características físicas de la roca.— Mediciones efectuadas en muestras de núcleos, indican una resistencia a la compresión del gneiss, de 1,700 a 2,500 Kg/cm². que las clasifica como rocas de alta, a muy alta resistencia. Además, como se indica, tienen un módulo elástico bajo, debido a la mica, por lo cual son muy tenaces.

Fig. 3.— Relación entre avance diario de velocidad de penetración y geología del túnel No. 2.

3).— Características mecánicas de la masa rocosa.— El R.Q.D. que es el espaciamento natural de las juntas y fracturas, en este caso, resultó desfavorable en muchos tramos, por el tamaño de la rezaga que no podía ser manejada por los cangilones.

4).— Anomalías Geológicas, Filtraciones.— La rezaga con el agua formaba un lodo fluido que no se puede sostener sobre la banda, derramándose al piso para después ser traspaleado a mano, lo cual ocasionó resultados desfavorables con la operación de la máquina Topo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- WEISS, L.E., The minor structures of deformed Rocks.
THE GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA. Geological factors in rapid excavation. (Symposium, Cases history of Engineering Geology).
GAMBOA, CH. J., Túneles con topo mecánico.
VEYTIA BARBA, M., Estudios Geológicos preliminares de la zona de localización de los túneles 1 y 2 del Acueducto Río Colorado—Tijuana, S.R.H.
VEYTIA BARBA, M., Operación Topo en la excavación de túneles del Acueducto Río Colorado—Tijuana, S.R.H.