

Geología y experiencias constructivas en el túnel Tunjita

EDUARDO TEJADA S. *

Geólogo, Universidad Nacional
Bogotá, Colombia

RESUMEN

Esta obra realizada por Interconexión Eléctrica S.A. y ubicada en el Municipio de Macanal (Boyacá), cuenta con una longitud total de 14.200 m. Fue construida para desviar las aguas del río Tunjita ($12 \text{ m}^3/\text{seg}$ de caudal medio) hacia el embalse del proyecto Chivor. Su sección circular y en herradura presenta área variable entre 14.50 m^2 y 21.20 M^2 . Fue excavado completamente en rocas sedimentarias (areniscas ortocuarcíticas, lutitas y limolitas silíceas) pertenecientes a la Formación Cáqueza Superior del Cretáceo Inferior.

El frente de aguas arriba (5830 m) se realizó por métodos convencionales, en tanto que el de aguas abajo se excavó con una máquina fresadora lo que constituye un hecho sin precedentes en Colombia. El primer frente presentó problemas constructivos mayores derivados de las condiciones geológicas adversas (lutitas y limolitas blandas y replegadas por fallas inversas), que ocasionaron

* Interconexión Eléctrica S.A.-ISA.- Apartado Aéreo 8915 Medellín.

desprendimientos y fuertes empujes a lo largo de los tramos excavados (K1 + 000, - K3 + 300 principalmente). Por aguas abajo las infiltraciones (70 l/seg) que alcanzaron temperaturas hasta de 45° C repercutieron desfavorablemente en los rendimientos de los avances.

INTRODUCCION

El presente trabajo resume las características geológicas principales encontradas en la excavación del túnel Tunjita, su comportamiento estructural y las experiencias logradas durante su construcción en lo relacionado con la efectividad del soporte temporal utilizado y al uso de la máquina fresadora (Tunnel Boring Machine) por uno de sus frentes, un hecho sin precedentes en Colombia.

La desviación del río Tunjita junto a la de los ríos Negro y Rucio hacia el embalse de la central de Chivor, aumenta la generación de ésta en un 30% al incrementarse en 20.5 m³/seg, los caudales propios del río Batá fuente principal de alimentación del embalse La Esmeralda.

Las excavaciones por los dos frentes del túnel se iniciaron hacia finales de 1978 y concluyeron en abril de 1983.

Tanto el diseño como la interventoría general de la obra corrió a cargo de la firma consultora INGETEC de Bogotá.

LOCALIZACION

El sitio del proyecto está localizado al oriente del Departamento de Boyacá entre los municipios de Miraflores al oriente y Macanal al occidente, en cercanías de la Central de Chivor (Figura 1A). El portal de entrada está ubicado sobre el río Tunjita junto a la confluencia de las quebradas Honda y Los Pinos donde se construye una presa derivadora en arco de 20 m de altura. El portal de salida queda localizado en cercanías del embalse La Esmeralda, junto a la carretera Guateque-Santa María, unos 8 km al sur de la localidad de Las Juntas, punto de confluencia de los ríos Batá y Garangoa que finalmente entregan sus aguas al embalse.

GEOLOGIA REGIONAL

El área de interés para el proyecto está cubierta por rocas sedimentarias de edad Cretácea que corresponden a las formaciones Cáqueza Medio, Cáqueza Superior y Fómeque.

La estructura principal (Figura 2), está representada por un pliegue sinclinal asimétrico (denominado Sinclinal El Dátil) cuyo eje lleva una dirección N-45-E en promedio. Superficialmente su flanco oriental por donde transcurre el alineamiento del túnel mantiene un buzamiento de 15-NW, pero a nivel de la excavación se presentan buzamientos desde 50-NW hasta subhorizontales lo que demuestra que el flanco sufre una flexión a profundidad.

Pliegues menores aparecen superficialmente a cotas elevadas respecto a la del túnel, la mayoría de ellas afectando niveles blandos, pero no fue posible determinar si estaban asociadas a fallas y si guardaban alguna relación con zonas de esfuerzo halladas en la excavación.

La falla más destacable ocurre cerca al portal entrada (apareció en la excavación en el km 1) y atraviesa el túnel transversalmente según una dirección N-45-W con buzamiento alto al suroeste. Es de tipo inverso y pone en contacto los niveles Kcs3 y Kcs2 (definidos más adelante). Otras fallas menores sin evidencias en superficie se manifiestan a nivel de túnel en las abscisas K1+280, K2+200 y K3+200.

Definición del corredor para el alineamiento del túnel

Luego de una evaluación del estudio geológico regional preliminar, se determinó que la ruta más favorable para el túnel lo constituía la Formación Cáqueza Superior (Kcs) sobre sus niveles intermedios por lo cual se decidió realizar un estudio estratigráfico detallado para caracterizar en la mejor forma posible los niveles litológicos que atravesaría el túnel. Con tal objeto se realizaron levantamientos detallados (escala 1:500) superficiales y entre las dos cuencas y se subdividió informalmente su secuencia sedimentaria en niveles y subniveles tomando como base las características litológicas comunes. Posteriormente este estudio se utilizaría para realizar correlaciones con los levantamientos ejecutados a nivel de túnel (escala 1:200).

Los niveles definidos en orden cronológico ascendente fueron los siguientes:

Kcs1: En general se trata de lutita y silícea y arenisca cuarzosa intercaladas y cuyo espesor no fue determinado.

Kcs2: Lutita silícea hasta carbonosa y localmente micácea, de color negro, laminada, con intercalaciones poco frecuentes de mantos finos y/o lenticulares de arenisca cuarzosa clara. Espesor 250 m aproximadamente.

Kcs3: Arenisca ortocuarcítica clara, de estratificación fina a gruesa, localmente lenticular, con intercalaciones generalmente frecuen-

tes de mantos finos a gruesos de lutita silícea negra. Espesor aproximado 270 m.

Kcs4: Constituye el tope de la Formación Cáqueza Superior estando compuesta por intercalaciones de lutita silícea negra y laminada y arenisca cuarzosa de color claro a gris oscuro de estratificación delgada a media. Espesor aproximado 500 m.

Finalmente con base en este levantamiento se decidió escoger un corredor sobre el nivel Kcs3 ya que la constitución predominantemente arenácea de éste, otorgaba suficientes garantías de estabilidad para la excavación.

CARACTERISTICAS GEOLOGICAS DE LA EXCAVACION

El túnel se inició por dos frentes que fueron denominados informalmente por el constructor como Tunjita Monte (aguas arriba) y Tunjita Valle (aguas abajo). El frente de aguas arriba con 5821 m de longitud, se inició sobre la abscisa K0 + 010 y finalizó en la abscisa K5 + 831 y fue excavado en su totalidad por el método tradicional de voladura. El frente de aguas abajo empezó en la abscisa K13 + 860 y finalizó en K5 + 406 con una longitud total de 8453 m, de los cuales 7171 m (entre K13 + 257 a K6 + 086) se realizaron con máquina fresadora. Los restantes se ejecutaron con voladura.

El criterio de diseño del alineamiento se fundamentó en la necesidad de mantener la excavación sobre la parte media del nivel Kcs3 equidistante de los niveles blandos de Kcs2 y Kcs4, lo cual era particularmente favorable para el frente de aguas abajo excavado con fresadora, ya que el equipo utilizado en este frente no es adecuado para trabajar en rocas blandas. Por esta razón en aquel frente el alineamiento del túnel resulta esencialmente paralelo al rumbo de la estratificación, (N-40-E a N-55-E en términos generales) como ocurre también en el primer km del frente de arriba. A partir de la abscisa K1 + 000 la presencia de los mantos de lutita del nivel Kcs2 obliga a adoptar una serie de curvas en el alineamiento para sacar a la excavación en la menor longitud posible de este nivel característicamente inestable. Los resultados de esta decisión y el alineamiento definitivo del túnel se pueden apreciar en la Figura 3.

Estratigrafía

Frente de aguas arriba

La excavación se inició sobre arenisca cuarcítica (ortocuarcita según análisis petrográficos) gris clara, de estratificación media hasta gruesa, dura, fresca y resistente, moderadamente fracturada; con intercalaciones poco frecuentes de

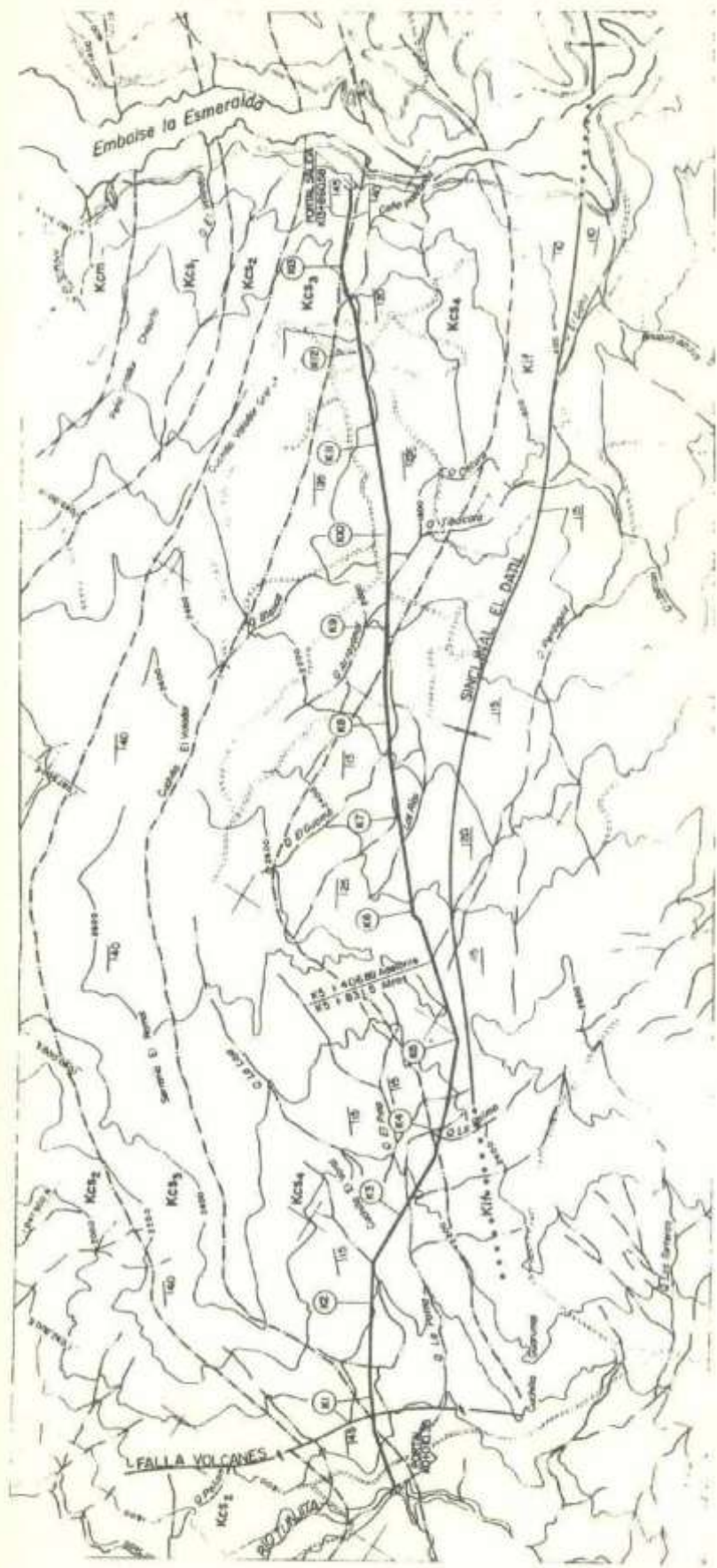


FIGURA No. 2
 MAPA GEOLOGICO REGIONAL

CONVENCIONES

SIMBOLOS

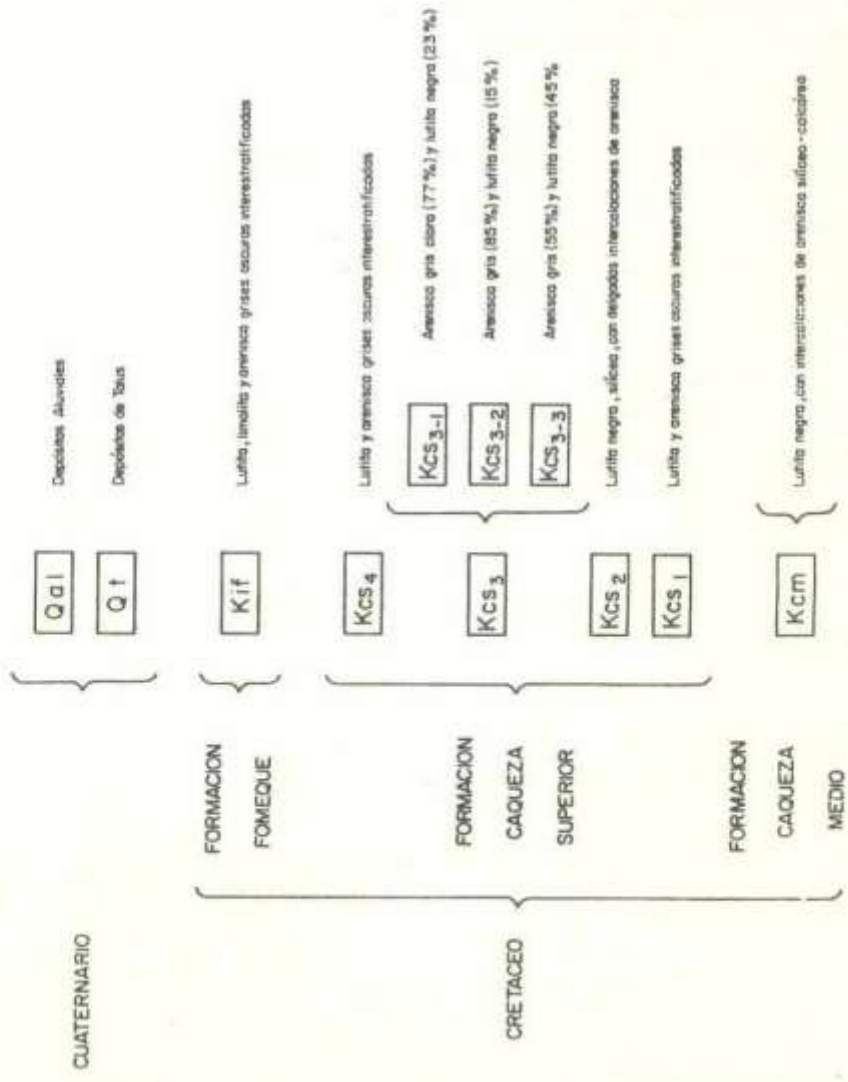
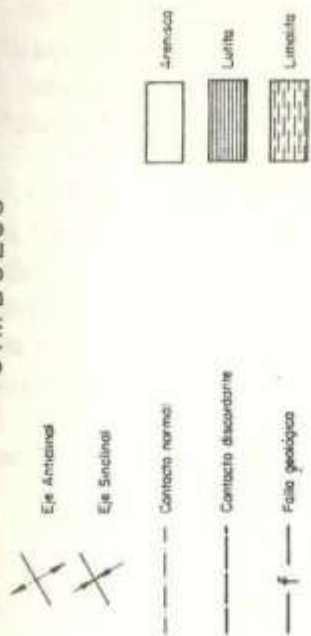


FIGURA No. 2 A

lutitas silíceas, negras, de estratificación delgada y dureza media (KO+750 - KO+780, KO + 850 - KO + 900, KO + 630 - KO + 675). Esta secuencia se interrumpe abruptamente en el Km 1 + 000 por el efecto de una falla inversa que levanta este nivel (Kcs3) dejando expuesta la excavación en el nivel Kcs2 (Figura 4). Rumbo y buzamiento promedio de la estratificación: N-45-E/45-NW.

Entre el K1 + 000 y K5 + 070 se excavó el nivel Kcs2 representado por lutita silícea negra (en algunos tramos como entre K1 + 400 - K3 + 600 se presenta una composición silíceo-carbonosa y localmente micácea), con laminación fina y dureza media a blanda, de fracturada o moderadamente fracturada; con intercalaciones más o menos frecuentes de limolita silícea negra, masiva y dura, y arenisca cuarzosa gris, de estratificación fina a lenticular, fresca y dura. En sectores de cizalla y repliegues es frecuentemente observar lutita blanda y arcillosa con abundantes espejos de fricción cortados por venas de calcita, dolomita y cuarzo lechoso, además de mineralizaciones muy diseminadas de sulfuros de cobre.

El rumbo de la estratificación es muy variable:

Entre K1+000 - K2 + 210: N-40-50-E/25-NW

Entre K2 + 210 - K3 + 260: Zona de plegamientos y de esfuerzos (Figura 3); el rumbo varía desde N-S/30-NW-SE pasando por N-50-E/15-NW y N-70-80-W/ subhorizontal.

Entre K3 + 260 - K4 + 200, el rumbo varía desde N-30-45-W/15-NE (hasta K3 + 850) a N-20-45-W/15-SW.

Entre K4 + 200 y K5 + 070, el rumbo paulatinamente se vuelve consistente en N-18-25-E/5-30°-NW.

Entre K5 + 070 hasta K5 + 831 la excavación atraviesa nuevamente el nivel Kcs3 por sus mantos más antiguos los cuales están compuestos por arenisca cuarzo-feldespática gris, oscura, de grano fino a medio, con estratificación delgada hasta laminada, dura y fresca, moderadamente fracturada; con intercalaciones de lutita silícea negra y laminada, de dureza media.

El rumbo de la estratificación varía entre N-10-30-E/20-25-NW.

Frente de aguas abajo

Este frente que se inició en la abscisa K13 + 860 atravesó estratigráficamente los mantos más bajos de la unidad Kcs4 hasta K13 + 656. Se excavó lutita silícea gris oscura, de estratificación delgada, hasta laminada y dureza media a blanda, localmente replegada; con intercalaciones de arenisca cuarzosa gris clara, de grano fino, de estratificación delgada, dura y fresca.

La estratificación mantiene un rumbo promedio de N-50-E/40-NW.

Desde K13 + 656 hasta la culminación del frente en K5 + 406, el túnel transcurrió por los diferentes mantos del nivel Kcs3. Valga decir que para mantener la máquina fresadora en sectores litológicamente adecuados y cumplir con los objetivos propuestos, el consultor llevó en todo momento un control estricto de los espesores de roca atravesados, en tal forma que para cualquier abscisa del túnel se podía conocer en un momento dado el sitio que dentro de la columna estratigráfica del nivel Kcs3 le correspondía. La roca predominante es una arenisca cuarcítica gris clara, desde laminada hasta masiva y con cierta frecuencia lenticular por cambios laterales de facies, el tamaño de grano varía de fino a medio, es dura, fresca y resistente, moderadamente fracturada y localmente replegada, con intercalaciones frecuentes de lutita silíceo negra, que aparece en lentes delgadas hasta mantos del orden de 3 m, siendo éstos últimos esporádicos; de dureza media pero localmente blanda.

Algunos sectores típicos con estas intercalaciones son: K11 + 390 - K11 + 240, K7 + 890 - K7 + 825, K7 + 740 - K7 + 640, K6 + 840 - K6 + 690, entre otros.

El rumbo de la estratificación es variable entre N-50-E/45-NW (Portal Salida) hasta N-35-E/15-NW,

De manera característica aparecen venas de dolomita y calcita atravesando la estratificación principalmente en el nivel Kcs3. En ocasiones se observan rellenando diaclasas. Su espesor no sobrepasa los 10 cm pero normalmente no superan unos pocos cm.

Geología estructural

Varios plegamientos, fallas inversas y zonas de esfuerzo se reconocieron a lo largo de la excavación.

Fallas y plegamientos

Sobre las abscisas K3 + 900 y K2 + 210 aparecen los ejes de sendos pliegues anticlinal y sinclinal respectivamente (Figuras 3 y 4), con buzamientos moderados sobre sus flancos. Estos plegamientos parece responder a esfuerzos generados por fallas adyacentes. Sus implicaciones regionales no es posible determinarlas con las reducidas observaciones permisibles bajo la sección de la excavación.

Sobre el K1 + 000 se presenta una falla inversa de dirección N-50-W y buza-

miento alto hacia el suroeste que desplaza el nivel Kcs3 verticalmente hacia arriba entre 110 y 130 m. La zona de brecha ocupa un tramo de unos 40 m donde predominan lutitas blandas y alteradas con espejos de fricción profusamente distribuidos. Por otra parte del lado del bloque caído se presentan buzamientos altos en tanto que en el bloque contrario aquellos son bastante suaves con replegamiento intenso en el contacto entre los dos bloques.

Entre K3 + 215 y K3 + 255 se presentan dos fallas inversas de poco salto y rumbo paralelo a la estratificación (N-S), con buzamiento elevado hacia el oeste. Sus pliegues de arrastre producen un pliegue sinclinal simétrico en un tramo de 40 m con flancos de buzamientos moderados.

De otra parte, se pudieron reconocer zonas de replegamientos o de esfuerzo en los siguientes sectores.

- a. K1 + 260 a K1 + 300: Se presenta un fuerte plegamiento que cambia el rumbo de la estratificación replegando en forma intensa la lutita laminada la cual está acompañada de espejos de fricción (falla?) aproximadamente paralelos a la estratificación. Los tipos de pliegues que se forman varían desde armónicos hasta policlinales.
- b. K2 + 220 a K2 + 310: En este sector se presentan un plegamiento fuerte motivado aparentemente por una falla inversa a la altura de K2 + 280. Aquí sólo se pudo comprobar, por su geometría, un pliegue tumbado con su eje orientado norte-sur donde la estratificación del lado occidental buza 30-E, en tanto que del flanco oriental está casi vertical.

Hay fracturamiento sistemático pero no fuerte, en cambio son notables los microplegamientos que ocurren con frecuencia.

- c. K3 + 050 - K3 + 260: Este tramo se caracteriza por replegamientos con evidentes señales de cizallamiento teniendo asociadas, por lo demás, las dos fallas mencionadas antes. La roca por otra parte presenta composición carbonosa esencialmente, muy susceptible a la alteración en el medio ambiente.
- d. K5 + 675: En esta abscisa ocurre un replegamiento local que involucra arenisca cuarzosa y lutita silícea del nivel Kcs3, el cual está acompañado de una diaclasa abierta de 2 m de espesor entre paredes y rellena de roca triturada (falla ?). Hay fuerte fracturamiento.

Diaclasas

Sobre la excavación se reconocen básicamente dos sistemas de diaclasas:

Sistema I: De dirección normal al rumbo de la estratificación y buzamiento generalmente superior a 60° en ambos sentidos; sus paredes son planas, lisas y normalmente oxidadas. Se presentan cerradas hasta ligeramente abiertas y en ocasiones rellenas de cuarzo lechoso, calcita y dolomita. Entre K4 + 000 y K5 + 100 existen diaclasas abiertas hasta 20 cm que parece están originadas por la excavación. La separación varía entre 0.10 m y 1 m y posiblemente son persistentes en su prolongación longitudinal.

Sistema II: Generalmente paralelo a la estratificación y de inclinación contraria y ortogonal al buzamiento de ésta. Sus otras características son similares al primer sistema.

Estos sistemas son más evidentes en el nivel Kcs3. En el nivel Kcs2 la separación entre diaclasas varía en algunos sectores (K3 + 600 - K5 + 400) entre 5 cm y 20 cm. Adicionalmente en zonas de esfuerzo aparecen profusamente desarrollados los dos sistemas de discontinuidades a tal punto que en varias ocasiones causaron desprendimientos desde la clave del túnel cuando uno de ellos quedaba paralelo a la dirección del túnel (caso del ocurrido entre K2 + 335 - K2 + 378).

Infiltraciones

Incluimos su descripción en este capítulo por estar las infiltraciones controladas por los planos de fracturas presentes en las rocas.

Las infiltraciones están íntimamente asociadas al nivel Kcs3 siendo mínimas en el nivel Kcs2. Aparecen sobre el túnel en forma de goteo lento y rápido y ocasionalmente en chorros hasta de 3 l/seg. Por el frente de aguas arriba se alcanzaron hasta 10 l/seg (la mayoría provenientes del nivel Kcs3) y por el frente de aguas abajo se obtuvo un caudal máximo de 90 l/seg.

Se debe destacar por este frente la presencia de elevadas temperaturas (hasta 43°C) en el agua infiltrada, cuyo origen se ha supuesto asociado al gradiente geotérmico que debido a las elevadas coberturas que alcanzó la excavación pudo influenciar notoriamente el agua subterránea contenida en los niveles de las areniscas duras. Esta posibilidad está sustentada por el hecho reconocido del incremento de la temperatura del agua conforme se lograban coberturas más altas.

Esta característica representó uno de los mayores inconvenientes para la construcción del túnel puesto que las altas temperaturas desmejoraron considerablemente las condiciones ambientales en el frente de trabajo al desarrollarse calor y humedad excesivos en el mismo.

Las consecuencias de tal situación repercutieron de inmediato en los programas de trabajo ya que hubo de implantar turnos especiales de trabajo con jornadas más cortas y mejorar las condiciones salariales a los trabajadores entre otros. Con todo, fueron muchas las deserciones de personal aún dentro de la planta de mando lo que condujo a otra situación negativa: El enganche de personal sin experiencia, en las labores que deberían desarrollar.

A fin de mejorar las condiciones de trabajo se implementó un sistema de circulación a través de cámaras con hielo el cual se producía continuamente en una planta situada en el portal de salida del túnel. El aire al recircular por el hielo se enfriaba y era enviado al frontón mediante el uso de ventiladores. La solución resultó ser solamente parcial entre otras razones porque únicamente se reducía el calor en un sector muy particular del túnel. Finalmente cuando se cambió el sistema de excavación en la abscisa K6 + 086 de fresadora a voladura convencional, se mejoraron un poco más las condiciones de trabajo quizás por contarse con mayor espacio en el interior de la excavación. Naturalmente toda esta situación adversa tuvo una incidencia importante por el atraso que indujo en los rendimientos de los avances programados.

CARACTERISTICAS DE LA EXCAVACION CON FRESADORA

Resumiremos en este capítulo las principales experiencias obtenidas con la utilización de la máquina fresadora la cual laboró por el frente de aguas abajo del proyecto.

Las máquinas fresadoras (TBM) como sistemas de construcción de túneles son de uso relativamente recientes en el mundo. Inicialmente se diseñaron para trabajar en formaciones blandas (shales, areniscas blandas, etc.) pero paulatinamente ha venido mejorando su tecnología para laborar también sobre rocas duras (neises, calizas, granitos, areniscas duras, etc.).

Entre las principales razones para su uso se tienen:

- a. Altos rendimientos
- b. Eliminan los problemas propios del sistema convencional (repercusión de las voladuras) cuando se labora en cercanías de la superficie.

- c. La forma circular de la sección excavada produce una mejor redistribución de esfuerzos lo cual representa economía porque minimiza los requerimientos de soporte temporal.
- d. elimina o limita el riesgo de las sobreexcavaciones por consiguiente la cantidad de material de escombros a remover se reduce al necesario únicamente.

La máquina utilizada fue del tipo Robbins de fabricación norteamericana provista de los accesorios necesarios para ejecutar una sección circular de 4.30 m de diámetro en areniscas duras. En estas trabajó adecuadamente especialmente cuando atravesó niveles rocosos homogéneos de buena calidad, alcanzando avances de más de 20 m por día laborado; sin embargo, en varios sectores de este frente, cuando a causa de la dureza y composición mineralógica de roca (más del 90% de cuarzo y cemento silíceo) ésta alcanzó características muy abrasivas, se hizo notoria la reducción en los avances, en razón a que los «cutters» de la máquina perdía rápidamente su eficiencia obligando a su reposición continuamente perdiéndose tiempo precioso de trabajo con estos cambios.

Por otra parte, los niveles blandos intercalados de lutita representaron los más serios tropiezos en la excavación, puesto que éstos exigían con frecuencia la colocación inmediata de soporte temporal, labor que se dificultaba porque el cuerpo de la fresadora ocupaba buena parte de la sección. Una situación similar se presentaba con niveles de areniscas laminares o cuando aparecían cambios laterales de facies: arenisca-lutita.

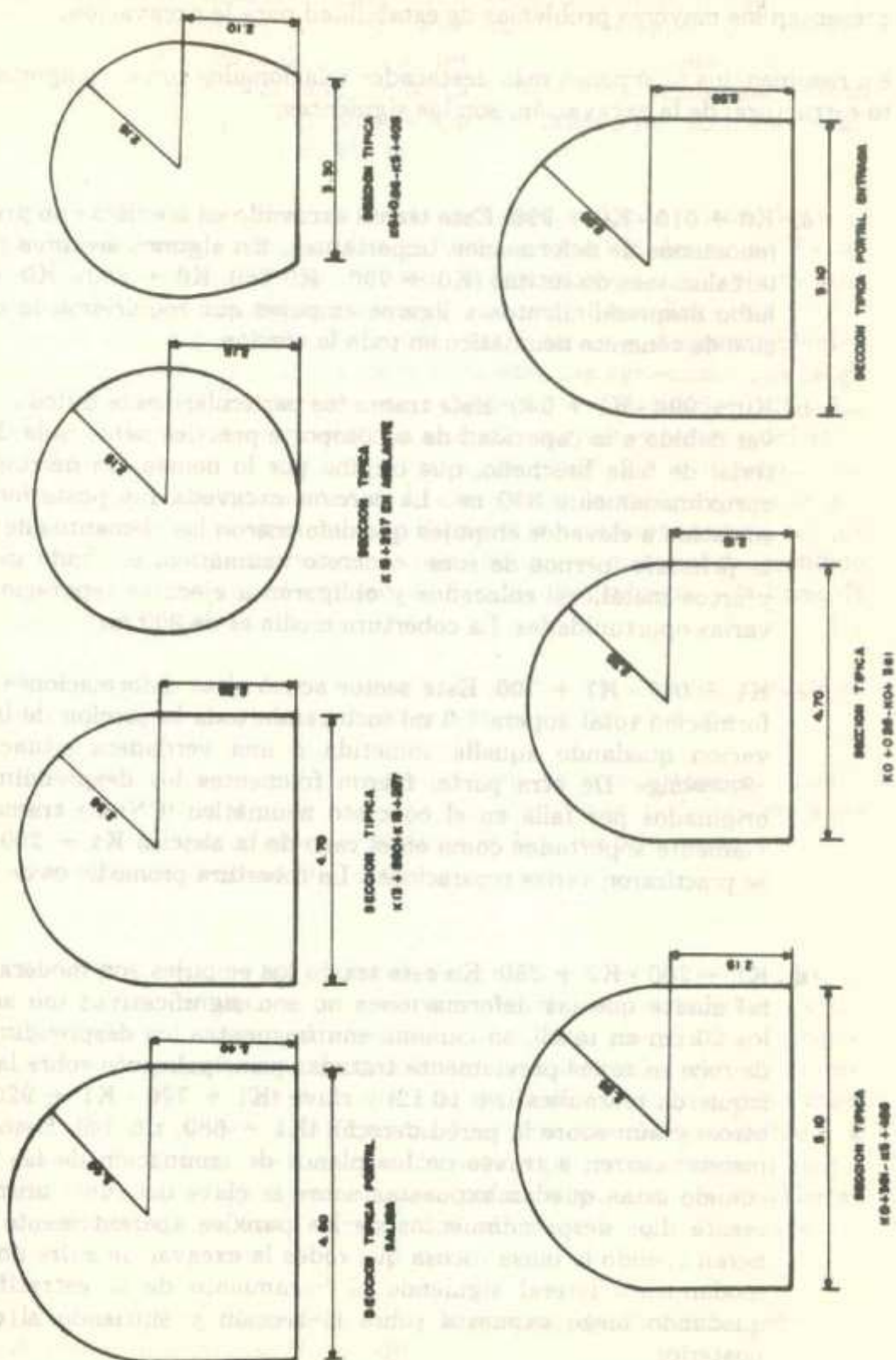
Adicionalmente, las condiciones ambientales críticas en la excavación, caracterizadas por altas temperaturas, incidieron en los rendimientos de la fresadora, al resentirse sus mecanismos hidráulicos.

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA EXCAVACION

El túnel fue excavado en sección circular y en herradura de pata recta, según se aprecia en la Figura 5, con áreas que varían entre 14.57 m² y 23.21 m². Su comportamiento estructural considerablemente diferente, se debe a las características geotécnicas particulares de cada uno de los niveles rocosos atravesados. En efecto, las areniscas del nivel Kcs3 presentan un aceptable auto-soporte en su excavación por tener probablemente parámetros de resistencia adecuados (resistencia media a la compresión inconfiada de 1100 kg/cm² y módulo de elasticidad medio de 1.61 x 10⁶ kg/cm²), en tanto que el nivel Kcs2 mantiene un precario auto-soporte (resistencia media a la compresión inconfiada de 380 kg/cm² y módulo de elasticidad medio de 8.4 x 10⁴ kg/cm²). Estas últimas características de las lutitas parecen definitivamente inadecuadas para absorber los esfuerzos generados por coberturas hasta de 1000 m.

SECCIONES TÍPICAS DE EXCAVACION

Fig. 5



Es claro a partir de este análisis global, que son las lutitas del nivel Kcs2 y que se extienden a lo largo del túnel entre K1 + 000 y K5 + 070, las que representan los mayores problemas de estabilidad para la excavación.

En resumen, los fenómenos más destacados relacionados con el comportamiento estructural de la excavación, son los siguientes:

- a. K0 + 010 - K0 + 990: Este tramo excavado en areniscas no presenta fenómenos de deformación importantes. En algunos sectores con intercalaciones de lutitas (K0 + 750 - K0 780, K0 + 850 - K0 + 900) hubo desprendimientos y ligeros empujes que requirieron la colocación de concreto neumático en toda la sección.
- b. K0 + 990 - K1 + 040: Este tramo fue particularmente difícil de excavar debido a la capacidad de autoaporte prácticamente nula del material de falla brechado, que originó por lo demás, un derrumbe de aproximadamente 350 m³. La sección excavada fue posteriormente sometida a elevados empujes que deformaron los elementos de soporte primario (pernos de roca, concreto neumático, entibado metálico y arcos metálicos) colocados y obligaron a ejecutar reparaciones en varias oportunidades. La cobertura media es de 300 m.
- c. K1 + 040 - K1 + 700: Este sector acusó altas deformaciones (la deformación total supera 1,0 m) incluyendo toda la sección de la excavación quedando aquella sometida a una verdadera situación de «squeezing». De otra parte, fueron frecuentes los desprendimientos originados por falla en el concreto neumático (CN) en tramos previamente soportados como en el caso de la abscisa K1 + 200 donde se practicaron varias reparaciones. La cobertura promedio es de 350 m.
- d. K1 + 700 - K2 + 250: En este tramo los empujes son moderados de tal suerte que las deformaciones no son significativas (no superan los 20 cm en total), en cambio, son frecuentes los desprendimientos de roca en zonas previamente tratadas principalmente sobre la pared izquierda hidráulica (z/h 10-12) y clave (K1 + 770 - K1 + 920 entre otros) y aún sobre la pared derecha (K1 + 680, z/h 3-5). Estos fenómenos ocurren a través de los planos de laminación de las lutitas cuando éstas quedan expuestas sobre la clave del túnel primordialmente. Los desprendimientos de las paredes aparentemente se generan cuando la masa rocosa que rodea la excavación sufre un reajuste lateral siguiendo el buzamiento de la estratificación quedando luego expuesta sobre la sección y sufriendo el colapso posterior.

Otro fenómeno importante típico en este nivel de lutitas y que comienza a evidenciarse en este tramo es el denominado «buckling» o falla por pandeo del material rocoso cuando los empujes verticales vencen la resistencia de los paquetes de lutitas laminadas o finamente estratificadas localizadas en la clave de la excavación dando como resultado una especie de pliegue sinclinal fallado por su plano axial. La cobertura media es de 450 m.

- e. K2 + 250 - K3 + 650: Es quizás este sector el más crítico desde el punto de vista de estabilidad en toda la longitud del túnel. Es característico el «squeezing» intenso, destacándose los levantamientos de solera y deformaciones en la clave, así como «buckling» (K2 + 310, K2 + 590, K2 + 840, K3 + 225, entre otros) y desprendimientos entre zona horaria (z/h) 9-1. Son frecuentes los agrietamientos longitudinales en clave y paredes como desde K3 + 130 a K3 + 139 y K2 + 430. Un sector notoriamente afectado por las excesivas deformaciones se presentó entre K3 + 050 y K3 + 250 donde se produjeron continuos desprendimientos de la clave sobre la masa soportada que requirieron varias reparaciones. Respecto a estas zonas se anota que a menudo quedan sobreexcavaciones porque el material desprendido (y en ocasiones por el proceso de desabombe) sobrepasa la línea de excavación teórica.

La cobertura media es de 600 m y la máxima deformación medida es de 25 cm, pero puede existir sector con mayor deformación.

- f. K3 + 650 - K4 + 000: Este tramo tiene un comportamiento relativamente estable si se le compara con el anterior, de todas maneras hay empujes que originan «buckling» en la clave principalmente. La cobertura media es de 700 m.

- g. K4 + 000 - K5 + 100: Existen deformaciones no muy intensas en toda la sección (squeezing moderado). Es frecuente «buckling» y característicos los desprendimientos de roca de la clave. Por otra parte existen empujes o reacomodamientos laterales especialmente sobre la pared izquierda hidráulica la cual se desplaza hacia la excavación por los planos de estratificación. Hay fracturamiento constante a través de sistemas de diaclasas de poca separación entre sí. Estas discontinuidades, que se presume, cerradas inicialmente, están abiertas desde pocos mm hasta varios cm y se considera que la excavación incidió en su apertura.

La cobertura media es de 850 m y la máxima deformación medida es de 20 cm en la abscisa K4 + 620.

- h. K5 + 100 - K5 + 680. Este tramo comprende algo más de 1000 m por el desfase de 425 m entre los dos frentes. Se caracteriza por los desprendimientos de la clave. Son evidentes los empujes verticales pero las deformaciones laterales tienden a atenuarse a partir de K5 + 550. Esta situación continúa casi coincidentalmente hasta el empalme (K5 + 410, control de aguas abajo) donde los bancos de arenisca que «suben» hacia la clave estabilizan la excavación notablemente.

Es interesante anotar también que aunque se soportan coberturas que varían entre 850 y 1100 m, las deformaciones son menores que en el tramo inmediatamente anterior (máxima deformación de 4.2 cm en K5 + 670 donde se originó una gran sobreexcavación por fuerte replegamiento).

Por el frente de aguas abajo se tienen entre K13 + 860 y K13 + 656 caída de pequeñas cuñas de roca y de material suelto debido al predominio de lutitas. Luego entre K13 + 656 y K13 + 680 aparecen desprendimientos de la clave cuando ésta coincide con estratos laminados de lutita y/o estratos laminares o lenticulares de arenisca, y laterales en menor proporción; pandeamientos o «buckling» asociados a altas coberturas y frente a las mismas características estratigráficas anteriores y reacomodamientos laterales sobre la pared izquierda siguiendo los planos de estratificación en las lutitas. Los empujes afectan también la solera que sufre levantamiento sobre ese mismo costado.

Es importante anotar que la acentuación de estos fenómenos va en proporción directa con el aumento progresivo de la cobertura, sin embargo las deformaciones desarrolladas son mucho menores que las existentes en el frente de aguas arriba puesto que las deformaciones máximas medidas no sobrepasan escasos cm, siendo en promedio del orden de 1 cm.

La cobertura varía entre 950 y 100 m en el portal salida.

Del análisis anterior se deduce que las intercalaciones de lutita y aún la arenisca que desarrolla estratificación fina hasta laminar y lenticular (esta última por cambios laterales de facies), juegan un papel tan preponderante como negativo en la estabilidad de la excavación por este frente de aguas abajo.

En los siguientes tramos caracterizados por aquellas intercalaciones, se manifiestan claramente todo este tipo de fenómenos siendo especialmente típicos los desprendimientos:

K11 + 390 - K11 + 240, K7 + 890 - K7 + 825, K7 + 740 - K7 + 640,
K6 + 840 - K6 + 690.

Origen de las deformaciones

A continuación se intenta analizar someramente los mecanismos que generan los fenómenos descritos antes.

Se debe recalcar ante todo que la carencia de un adecuado autoaporte en la lutita está relacionado con los precarios parámetros de resistencia de la roca en una excavación que alcanza coberturas hasta de 1000 m.

Para las zonas de falla y en general de esfuerzos donde la roca por estar sujeta a esfuerzos tectónicos no sólo se fractura y se pliega sino que además se descompone, su resistencia alcanza valores críticos, por esta razón los tramos que mayor deformación presentan en la excavación corresponden a las zonas más afectadas tectónicamente. De otra parte, en varios de estos sectores, como por ejemplo entre K1 + 000 y K1 + 700, K3 + 050 y K3 + 250, entre otros, se pudo demostrar mediante análisis de la instrumentación que hay aumento en las variaciones de la deformación con el tiempo, es decir que estamos frente al fenómeno de fluencia. Este se presenta bajo características visco-plásticas particulares de la masa rocosa que rodea la excavación. Tales características seguramente son impuestas a la roca por los procesos tectónicos y de alteración que ha sufrido a lo largo de su historia geológica. Con frecuencia ocurrió que las deformaciones continuaban aún después de soportada la sección produciendo aflojamiento en el material y colapso posterior. Por ello en estos sectores se realizaron continuas reparaciones.

Otro fenómeno que influye notablemente en la excavación de rocas arcillosas es la expansibilidad que se presenta por la reacción química de los minerales arcillosos (montmorillonita principalmente) cuando absorben agua. El resultado es un incremento en su volumen originando presiones de expansión. Para el túnel Tunjita no nos es posible afirmar la existencia de tales presiones entre otras cosas porque esta formación de lutitas se encuentra prácticamente seca.

En cuanto a los desprendimientos podemos admitir que existen dos tipos de mecanismos que los generan: de una parte, durante la apertura de la excavación subterránea se origina una redistribución de esfuerzos que produce aflojamiento en la masa rocosa y la consiguiente pérdida de homogeneidad en la misma; pero además si existe un fracturamiento sistemático a través de diaclasas paralelas a la excavación contenidas en planos de estratificación subhorizontales, este fenómeno cobra mayor vigencia. Este es el caso de los desprendimientos del tramo del túnel entre K3 + 600 y K5 + 800 aproximadamente. Por otra parte al considerar que la redistribución de esfuerzos induce deformaciones en la excavación, podemos asociar el «buckling» como manifestación de esa deformación. En definitiva resulta que el «buckling» produce desprendimientos del tipo analizado antes, como efectivamente lo demuestra la construcción del túnel.

Un segundo tipo de desprendimiento ocurre cuando debido a la heterogeneidad del material que rodea la excavación, se origina una concentración de esfuerzos en determinados punto de la sección excavada, que luego son liberados súbitamente mediante la falla del material produciendo su fragmentación brusca. Aquí, de nuevo, el fenómeno está ligado a la redistribución de esfuerzos particularmente en excavaciones hechas a grandes profundidades. En el túnel Tunjita este tipo de desprendimiento se presenta por el frente de aguas abajo donde existe intercalaciones de lutitas silíceas de dureza media hasta blanda entre areniscas ortocuarcíticas duras; por el frente de aguas arriba ocurre en ciertos tramos dominados por coberturas altas. En todos los casos la zona más afectada es la clave.

SISTEMAS DE SOPORTE TEMPORAL

El sistema de soporte temporal se adoptó teniendo en cuenta que «el elemento principal de estabilización y soporte de la excavación es la roca misma», reforzada con pernos y protegida con concreto neumático. Este es, por otra parte, el fundamento del «Nuevo Método Austríaco de excavación de túneles».

En concordancia con este criterio los principales elementos de refuerzo consistieron básicamente en pernos de fricción, concreto neumático y malla metálica. Eventualmente se utilizaron marcos metálicos.

Las características de estos elementos son las siguientes:

- Pernos de roca: Tipo «RS» con la varilla embebida en resina. Su longitud normal es de 2.40 m y una pulgada de diámetro. La varilla es de hierro corrugado lo cual se aprovecha para atornillar el perno y fijarlo contra la roca. Asociado a éste se utilizó de manera no sistemática platina y canaleta metálicas hasta 2.65 m para uniformar y ampliar la acción del perno sobre la superficie reforzada; fue especialmente útil por el frente de aguas abajo aunque por el frente de aguas arriba también se utilizó.

Normalmente el perno fue colocado radialmente siguiendo un patrón de distribución de uno por cada punto horario, es decir doce o trece en la sección y espaciados longitudinalmente un metro. Ocasionalmente se colocaron pernos en «spiling», valga decir, sobre la clave del frente de excavación en forma inclinada hacia el área adyacente no excavada.

- Concreto neumático: Se colocó en capas variables entre 3 y 15 cm de espesor, en bóveda y paredes.

- Malla metálica: De tipo Q-4 y Q-8 electrosoldada.
- Marcos metálicos: Son de tipo HE-140-B. En total se colocaron 35 marcos metálicos en K0 + 990, K1 + 275 y K5 + 675 complementándose con entibado metálico.

La secuencia normal de colocación del soporte se inició con la fijación de la malla metálica (eventual hasta K3 + 500 pero sistemática de ahí en adelante) contra la roca, posteriormente se anclaron los pernos y finalmente se lanzó el concreto neumático. A veces y sobre la base de las condiciones de estabilidad se alteraba este orden. Por regla general el soporte inicialmente colocado consistía en pernos sobre la clave (4 a 5 en total) y concreto neumático en capas delgadas (3 a 5 cm de espesor), posteriormente y dependiendo del comportamiento estructural de la excavación para lo cual se contaba con el apoyo de la instrumentación, se decidía completar el arco de pernos y lanzar una capa más espesa de concreto neumático en bóveda y paredes; cuando se sospechaban altas deformaciones por las propiedades mecánicas de la roca que se excavaba o sencillamente por la experiencia con los tramos adyacentes se colocaba de inmediato todo el refuerzo necesario.

Con algunas excepciones, prácticamente todo el sector correspondiente al nivel Kcs2 cuenta con soporte sistemático el cual incluye pernos radiales sobre toda la sección, malla electrosoldada según las condiciones anteriormente comentadas y concreto neumático sobre toda la sección. A partir de la abscisa K5 + 100 donde se inicia la excavación de los niveles estratigráficamente más bajos del nivel Kcs3 y en concordancia con la atenuación de los empujes principalmente laterales, el soporte se reduce básicamente a malla electrosoldada tipo Q-8 y pernos entre la z/h 9-2 con lanzado esporádico de concreto neumático. El refuerzo se va disminuyendo paulatinamente en tal forma que para ciertos sectores entre K5 + 406 y K5 + 680 (abscisas según el control topográfico de aguas abajo) sólo se utilizaron pernos con platinas en la clave.

Por el frente de aguas abajo los pernos de roca constituyeron el elemento básico de soporte, éste en general se anclaba a la roca con platina y canaleta metálica que alcanzaba en ocasiones hasta 2.65 m de longitud y dispuesta según el contorno de la bóveda; adicionalmente se lanzaba concreto neumático en espesor por lo regular no mayor a 10 cm. Normalmente este sistema se colocó sobre la clave en los tramos de desprendimientos (z/h 10-2), pero a veces también se utilizó sobre las paredes especialmente el concreto neumático.

El sistema de soporte primario utilizado representa un tipo flexible de refuerzo que permite controlar las deformaciones y ofrecer la suficiente seguridad a la excavación; es, al mismo tiempo, compatible con las características estratigráficas y tectónicas del macizo rocoso atravesado que acusa fracturamiento

de moderado hasta alto en rocas laminadas (nivel Kcs2) con buzamientos bajos. Estas condiciones heterogéneas deben ser suficientemente uniformizadas a nivel de la excavación para facilitar la formación del arco de carga natural, para que por otro lado, se pueda transmitir a éste la masa aflojada que le subyace; ello se logra mediante el uso de los pernos de roca. La malla y el concreto neumático complementan el sistema cumpliendo principalmente la función de protección evitando la caída de fragmentos rocosos sueltos sobre el área excavada.

REVESTIMIENTO DEFINITIVO

Se hace en este capítulo un resumen generalizado acerca de las características de los diferentes tipos de refuerzo que se utilizarán en el revestimiento definitivo del túnel.

El túnel funcionará a flujo libre con un caudal máximo de 40 m³/seg y contará con un control de caudal por el portal de entrada consistente en un orificio restringido el cual garantizará su funcionamiento para aquellas condiciones.

En la definición del revestimiento definitivo participaron activamente el consultor, la firma constructora e Interconexión Eléctrica como empresa propietaria del proyecto. La decisión final se fundamentó en la necesidad de garantizar la mayor seguridad posible para el proyecto.

El cálculo y determinación del tipo de revestimiento aprovecha de una parte los resultados del programa de instrumentación realizado en la excavación, los cuales permiten conocer en virtud de un tratamiento matemático la deformación final de los sectores en consideración para el momento del revestimiento. Por otra parte, paralela pero independientemente del criterio anterior se desarrolla otro proceso matemático que toma como base los parámetros de resistencia (resistencia a la compresión inconfiada y módulo de elasticidad) ya conocidos sobre muestras tomadas, los cuales, a través de una correlación con el índice de calidad de la roca (RQD) estimado previamente sobre los tramos en consideración, determinan estos mismos parámetros para el macizo rocoso.

Finalmente se llega previo el cálculo de otros parámetros a definir la curva presión interna vs. deformación y es aquí donde se involucran los resultados de la primera fase, es decir, los de la deformación a la fecha del revestimiento para determinar la presión interna necesaria para estabilizar la excavación de los sectores considerados.

El tipo de revestimiento definitivo adoptado, es el siguiente (Figura 6):

- a. Un tramo comprendido entre K0 + 350 y K5 + 680 (según control topográfico de aguas abajo) que se revestirá totalmente en concreto convencional. Este sector incluye todo el nivel Kcs2 atravesado y una parte relativamente pequeña del nivel Kcs3.

Las condiciones de revestimiento prevén la necesidad de retirar todo el material suelto retenido en la malla metálica y presente en sectores como: K4 + 270 y K4 + 350, K4 + 420 y K4 + 470, K4 + 820 y K5 + 170, K5 + 240 y K5 + 290, entre otros (fotos 5,11,12,13,14 y 15). El espesor mínimo de concreto será de 15 cm y un máximo que dependerá del ajuste de la formaleta a la sección excavada (la formaleta tiene tres diferentes posiciones) de tal manera que para secciones sobreexcavadas el espesor de concreto puede sobrepasar el metro.

Entre K4 + 530 y K5 + 100, se ejecutarán inyecciones de consolidación siguiendo el esquema siguiente:

Se realizarán cuatro perforaciones sobre la clave a cada 5 m y se penetrará 2 m en roca para inyectar a 5 Kg/cm² de presión.

Adicionalmente se realizarán inyecciones de contacto entre concreto y roca para sellar los espacios dejados en el proceso de revestimiento.

Este tramo también incluye solera curva en concreto con un espesor mínimo de 25 cm en el centro.

- b. Para el sector excavado con fresadora (K13 + 257 - K6 + 086) se decidió recubrir algunos sectores con malla metálica y concreto neumático (entre 10 y 15 cm de espesor) los cuales se reforzarán con pernos de fricción en aquellos sitios que así lo exijan; normalmente su longitud será de 2.40 m pero deben colocarse hasta de 3.50 m en tramo donde se evidencie la persistencia de ligeros empujes.

De otra parte, este sector que cuenta con sección circular, mantiene sobre el piso un prefabricado de concreto que servía de apoyo a la máquina fresadora para su desplazamiento. Este se fijará a la roca con dos pernos de 1.2 m de longitud y su finalidad esencial es la de proteger la misma.

Aquellos tramos caracterizados por roca de buena calidad y que generalmente coinciden con bancos de arenisca masiva, se ha decidido retirar el prefabricado por considerarlo innecesario.

Algunos de los sectores donde se ejecutará el tipo de revestimiento del punto b, son: K7 + 245 - K7 + 400, K7 + 600 - K7 + 930, K8 + 765 - K8 + 975, K9 + 595 - K9 + 750.

Para parte del tramo de empalme entre los dos sectores tratados en los puntos a y b (K5 + 995 - K5 + 680), se decidió colocar una capa de concreto neumático de espesor variable entre 10 y 20 cm reforzada con pernos de 2.40 m de longitud en una cantidad estimada de 4 pernos radiales por metro lineal de excavación y solera curva en concreto. Así mismo para los tramos: K0 + 026 y K0 + 850, K5 + 995 y K6 + 085, K13 + 257 y K13 + 855 se construirá solera plana de 0.30 m de espesor anclada a la roca con dos pernos de 1.50 m de longitud.

Los portales tendrán un recubrimiento en concreto convencional de 30 cm de espesor incluyendo solera plana con el mismo espesor. La longitud a cubrir en cada portal es de 6 m.

CONCLUSIONES

En el aspecto geológico se tienen las siguientes:

El estudio geológico regional a partir del cual se escogió la ruta a seguir por el túnel, fue provechoso, especialmente si se tienen en cuenta sus limitaciones propias, puesto que la estabilidad de la excavación resultó aceptable en buena parte de su longitud.

El comportamiento estructural de la excavación notablemente distinto cuando atravesó los niveles Kcs3 y Kcs2, está explicado por los diferentes parámetros de resistencia que los caracterizan.

Los tramos del túnel que resultaron con estabilidad más crítica en el nivel Kcs2, coinciden con aquellos sectores afectados por fenómenos tectónicos que al mismo tiempo soportan coberturas de roca de magnitud importante.

Las intercalaciones de lutita entre estratos duros de arenisca del nivel Kcs3, constituyeron una situación desventajosa para la estabilidad por cuanto facilita la concentración de esfuerzos.

Las características estratigráficas del nivel Kcs2 y su disposición estructural típica de buzamientos suaves, contribuyeron a desmejorar la estabilidad en la excavación especialmente cuando la dirección del alineamiento del túnel se asemejaba al rumbo de la estratificación.

Entre las experiencias durante la construcción, se tienen:

El sistema de soporte temporal utilizado a base de pernos de fricción, concreto neumático y malla metálica, resultó particularmente exitoso no sólo por su buen funcionamiento sino también por lo que representó para la economía del proyecto.

La falta de homogeneidad litológica del macizo atravesado por la frezadora afectó seriamente su rendimiento, lo mismo que la dureza excesiva de la arenisca en ciertos tramos. Ello indicaría que la continuidad litológica es requisito importante para asegurar rendimientos adecuados, e implicaría al mismo tiempo que los estudios geológicos en proyectos que involucren esta tecnología deben ser muy rigurosos al igual que los ensayos de laboratorio (ensayos de dureza, petrográficos, químicos, etc.).

El manejo de situaciones difíciles dentro de los túneles como son los que provocan los sectores de bajas condiciones geotécnicas, son más fáciles de sortear en excavaciones realizadas con métodos tradicionales ya que facilitan en mejor forma los trabajos de recuperación y de colocación del refuerzo correspondiente.

4. Las infiltraciones de agua a elevada temperatura representaron un factor tan desfavorable como decisivo para los rendimientos de los avances. Esta experiencia, al parecer sin antecedentes en nuestro país, es digna de tenerse en cuenta por el real significado que tiene para una excavación subterránea, por ello en el planeamiento de estudios de esta naturaleza, la investigación hidrogeológica debe ocupar lugar esencial.

ABSTRACT

The project site is located near the municipality of Macanal (Boyacá) approximately 170 km northeast of Bogotá. The project is a 14.200 m long diversion tunnel from the Tunjita river to the Chivor project reservoir with circular and horsehoe section, ranging from 21.20 m² to 14.50 m² all of it across sedimentary rocks belonging to the Caqueza Superior Formation of Cretaceous age.

The upstream stretch was excavated using conventional methods, while in the downstream stretch was used a drilling machine, first experience in Colombia. Main construction problems were related to tectonic and lithologic features and occurred at the upstream stretch, which induced rock falls as well as significant rock movements along the excavated tunnel.

The infiltrations reached values up to 70 l/sec with temperature up to 45°C which affected in an unfavorable way the output of the project.

BIBLIOGRAFIA

- COATES, D.F. 1973. *Mecánica de Rocas*: Lito print, Madrid.
- DREYER, WOLFGANG, 1982. *La Mecánica de Rocas en la Práctica Minera*: Conferencias dictadas durante el «Seminario de Mecánica de Rocas», en la Facultad de Minas de Medellín.
- HOBBS, BRUCE E., 1981. *Geología Estructural*: Ediciones Omega S.A., Barcelona.
- INGETEC, 1979-1984. *Informes de Progreso proyecto «Desviaciones al Embalse de Chivor»*. Nos. 1-50, Bogotá.
- INGETEC, 1984. *Informe Final Geología Túnel río Tunjita (Preliminar)*, Bogotá.
- INGETEC, 1984. *Informe Técnico No. 7 de Instrumentación (Preliminar)*, Bogotá.
- KOTTOWSKI, FRANK, E., 1965. *Measuring Stratigraphic Sections*. New México.
- PROCTOR, ROBERT, V., 1977. *Rock Tunneling with Steel Supports*: Commercial Shearing Inc. Ohio.
- RENZONI, G., 1968. *Geología del Macizo de Quetame*: Geología Colombiana. No. 5 U.N. Facultad de Ciencias, Bogotá.
- INSTITUTO NACIONAL DE INVESTITACIONES GEOLOGICO-MINERAS, *Geología del Cuadrángulo K-12, Guateque*: Bol. Geol. V.XXII, No. 1, p. 1-47, Bogotá.