

EL TÚNEL DE DOSQUEBRADAS

(The tunnel of Dosquebradas)

Fabio Jaramillo Correa*, Mauricio Lalinde, José Luis Naranjo Henao**

Universidad de Caldas, Colombia, *cucojara@une.net.co, **joseluis.naranjo@ucaldas.edu.co

(Recibido el 15 de julio de 2009 y aceptado el 01 de septiembre de 2009)

Resumen:

Para el desarrollo vial de la Autopista del Café, entre las ciudades de Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal, en el departamento de Risaralda, fue necesaria la construcción de un túnel de 134 m de longitud, que conecta con un puente helicoidal, permitiendo (ambas estructuras) vencer las diferencias topográficas existentes en la zona, y manteniendo la pendiente longitudinal en el 7,0%. El túnel se construyó sobre esquistos verdes y grafitosos del Complejo Arquia. En toda su longitud, es curvo, con un radio de 99,5 m. Internamente tiene una altura libre de 5,63 m y un ancho de rodadura de 10,0 m, incluidos sobreanchos y bermas. La dirección del túnel es aproximadamente N-S, y los esquistos están orientados 35° en promedio hacia el NE, con inclinación de 40° al SE. La metodología utilizada para el diseño y construcción consistió en analizar el macizo rocoso, en forma tridimensional, mediante métodos de elementos finitos, con posterioridad al predimensionamiento por metodología convencional y de evaluación de condiciones geológicas y geotécnicas, usando el criterio de revestimiento provisional y definitivo único, mediante utilización de concreto adicionado con fibras metálicas y micro fibras poliméricas, y la utilización de soporte de cerchas en celosía construidas con acero de refuerzo.

Palabras clave: túnel, esquistos, revestimiento, concreto, celosía

Abstract:

To achieve the vial solution of the highway located between Dosquebradas and Santa Rosa de Cabal, in Risaralda state region of Colombia, was necessary to build a tunnel 134 m length, that is part of an helicoidally way solution, allowing between both structures maintain the permissible road grade of 7,0%. Tunnel was bored across green graphitic schists of Arquia Complex. All the road, included tunnel, is developed in curve with a 99,5 m radius, 5,63 m free height and a 10,0 m road wide, included over-wide and berms. Tunnel direction is approximately N-S and schists are oriented 35° in average toward NE and an slope of 40° toward SE. Analysis methodology used for design and construction consisted in performing tridimensional analysis using finite elements, carry out a pre-dimensional analysis for conventional methods, geological and geotechnical evaluation, an use of a sole shotcrete liner reinforced with metallic and polymeric fiber imbibing support lattice steel bar welded arches.

Key words: tunnel, schists, covering, concrete, lattice

1. INTRODUCCIÓN

El túnel de Dosquebradas hace parte de la construcción de un par vial de la nueva calzada de la Autopista del Café, en el tramo comprendido entre El Mandarino y el Estadio de Santa Rosa, que comunica las poblaciones de Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal, en el departamento de Risaralda (Ver figura 1).

El túnel, con 134 m de longitud, fue diseñado y construido mediante el uso de cerchas en celosía, fabricadas a partir de acero de refuerzo, con la forma del túnel, instaladas a espacios de 50 cm, para soporte temporal y definitivo, y recubiertas con concreto lanzado, adicionado con fibras metálicas y una sola etapa de revestimiento.

La salida del túnel conecta con un puente helicoidal, permitiendo (ambas estructuras) vencer las diferencias topográficas existentes en la zona, y manteniendo la pendiente longitudinal de la vía en el 7,0%. La excavación se hizo con excavadora, sin necesidad de usar explosivos, y para la construcción se utilizaron materiales y personal netamente colombianos (agregados, aditivos, cemento, acero, soldadura para arcos, diseñadores y contratistas).

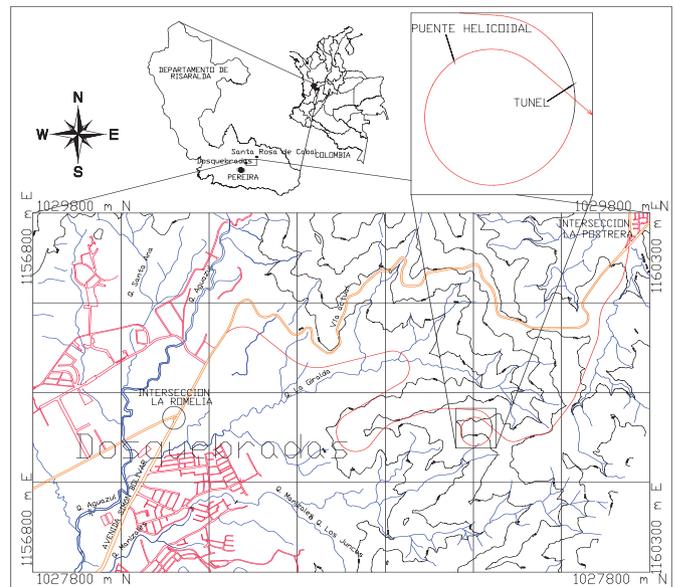


Figura 1. Mapa de localización del túnel.

2. ANTECEDENTES

Dentro del proyecto vial Armenia - Pereira - Manizales, la Sociedad Concesionaria “Autopistas del Café S.A.”, realizó el estudio de cinco alternativas para mejorar la

transitabilidad entre los municipios de Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal, habiendo seleccionado la alternativa de par vial, que actualmente está en construcción.

La alternativa seleccionada contempla la construcción de un túnel curvo de 134 m de longitud, que cruza por debajo de la divisoria de aguas que separa las cuencas de las quebradas La Chillona y Manizales, dentro de la gran cuenca de la quebrada Dosquebradas.

3. MARCO GEOLÓGICO

Dos unidades geológicas mayores se encuentran en el sitio, separadas por la Falla Santa Rosa Oeste (Naranjo, 2005), que es una de las fallas que constituyen el Sistema de Fallas de Romeral (SFR). Estas unidades son: el Complejo Arquía (CA), que se localiza al occidente de la falla, y la Anfíbolita de Chinchiná - Santa Rosa, al oriente (ver figura 2).

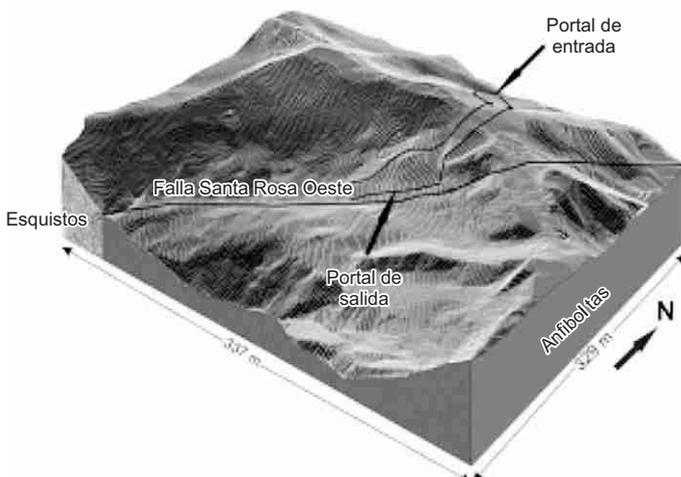


Figura 2. Modelo digital de terreno del sitio donde se localiza el túnel. Las líneas negras que hay entre los dos portales indican su proyección en superficie. El modelo muestra las dos unidades geológicas principales que constituyen el basamento de la zona: una unidad de esquistos grafiticos intercalados con esquistos verdes, que se localizan al occidente, y una unidad de anfíbolitas, al oriente. Nótese que el túnel se construyó en la unidad de esquistos.

El CA en esta parte de Colombia está constituido por paquetes de esquistos grafiticos, esquistos verdes y esquistos talcosos, dispuestos en forma de grandes cuñas entremezcladas. Cada cuña puede variar en anchura entre 1 y 2 km, por varias decenas de km de longitud, y siempre están orientadas con rumbo N-S, alineadas con la dirección del fallamiento regional. Todas las unidades rocosas han desarrollado un perfil de meteorización de varios metros de espesor, con formación de suelos residuales arcillosos, que descansan sobre la parte saprolitizada de las rocas, un poco menos meteorizada. Cubriendo las unidades rocosas, se presenta un depósito de cenizas volcánicas con espesores variables entre unos pocos centímetros y hasta de seis metros. Aunque este depósito es muy continuo en toda la región, cerca de los lechos de las quebradas o en aquellos sitios donde se han

hecho cortes para vías o construcciones, han desaparecido, siendo estos los lugares donde es posible encontrar afloramientos del suelo residual derivado de las unidades inferiores, o incluso la roca misma.

La Falla Santa Rosa Oeste no presenta gran evidencia geomorfológica y su reconocimiento se logra con trabajo de campo, ya sea por diferenciación litológica o por rasgos estructurales, como los espejos de falla, y por la diferencia en los perfiles de meteorización que presentan los dos tipos de roca en ambos lados de la falla. Tiene un rumbo general de N60°E y, en el espejo de falla, el plano está inclinado 75° hacia el W. Durante el trabajo de campo realizado para el desarrollo de este proyecto no se encontraron evidencias de movimientos recientes de esta falla.

El túnel se inicia en la vertiente izquierda de la quebrada La Chillona y termina en la vertiente derecha de la quebrada Manizales (ver figura 3), pasando por debajo de la divisoria de aguas. Esta divisoria está conformada por rocas metamórficas, esquistos grafiticos de color negro y esquistos verdes cuarzosos dispuestos en delgadas láminas de menos de 1 cm a 10 cm de espesor. Los esquistos están afectados por procesos de alteración hacia la parte más superficial, encontrándose en el área todo el perfil de meteorización.

Superficialmente afloran tres formaciones: las cenizas volcánicas; el suelo residual derivado de la meteorización de esquistos y anfíbolitas, y el cuerpo de un deslizamiento (Ver figura. 4). Durante la excavación se encontraron tres tipos de rocas (ver figura 5): un cuerpo de esquistos negros, localizado en el portal de entrada, que llega hasta la abscisa K9+079, en una longitud total de 31 m, medidos a lo largo del eje del túnel. Este cuerpo de roca pasa en contacto fallado a un cuerpo de roca ígnea, -un microgabro horbléndico-, de 27 m de espesor, en promedio, aunque la longitud total de la excavación en



Figura 3. Bloque diagrama ilustrando la posición del túnel con respecto a las unidades y estructura geológica en la divisoria de aguas donde se construyó.

este cuerpo fue de 31 m, medidos a lo largo del eje del túnel. Esta roca pasa, también en contacto fallado, a un cuerpo de esquistos verdes en el que la excavación se hizo en una longitud total de 66 m, ya cerca del portal de salida. En este portal el inicio de la excavación se hizo sobre el cuerpo de un movimiento de masa.

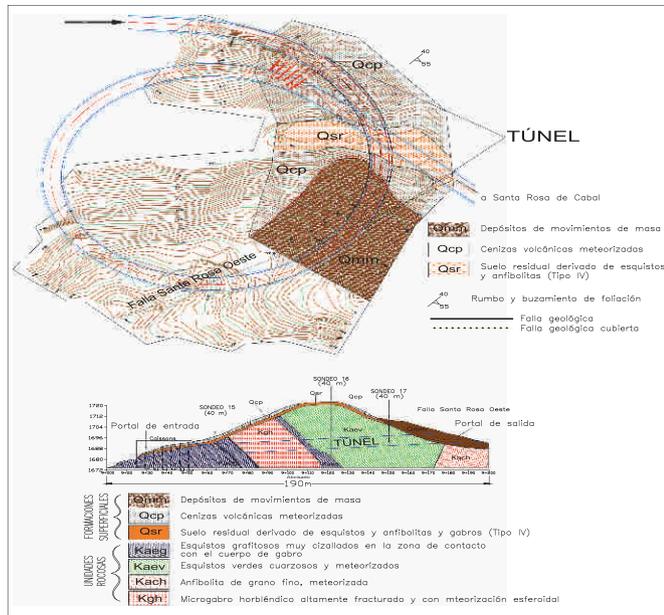


Figura 4. Mapa geológico de la superficie y sección geológica a lo largo del eje del túnel

Los tres tipos de rocas encontrados presentan un alto grado de meteorización, estando ubicados entre los grados III (roca moderadamente meteorizada) y IV (roca muy meteorizada), de la clasificación de Suárez, (1988). El cuerpo de gabro es el que presenta el mayor grado de meteorización, hasta el punto de poderse incluir en el grado V (roca totalmente meteorizada). La meteorización en estas rocas ha producido arcillas plásticas que facilitan el deslizamiento de bloques de roca, a lo largo ya sea del buzamiento o de zonas de fractura, situación que sólo se conocía en la medida que se iba avanzando en la excavación. En algunos casos se produjeron sobreexcavaciones, cuando se destapaba uno de estos planos y parte del material del techo o de los hastiales del túnel se derrumbaba, convirtiéndose esta situación en una sobre excavación inevitable. Dos juegos de fracturas predominantes se encontraron durante la excavación: una de dirección NE y otra NW. Las de dirección NE se inclinan tanto al NW como al SE, en la misma dirección de la inclinación de los esquistos, convirtiéndose -en la mayoría de los casos- en fallas locales de buzamiento.

Cuando se conjugan fracturas de dirección NW e inclinadas al SW, con la foliación, se generan cuñas de roca que quedan en estado incipiente de equilibrio, lo que generó sobreexcavaciones que fueron inevitables, a pesar de lo rápido que se colocaron las cerchas de sostenimiento. El cuerpo de gabros es el que presenta la mayor cantidad de fracturas, debido -básicamente- a la

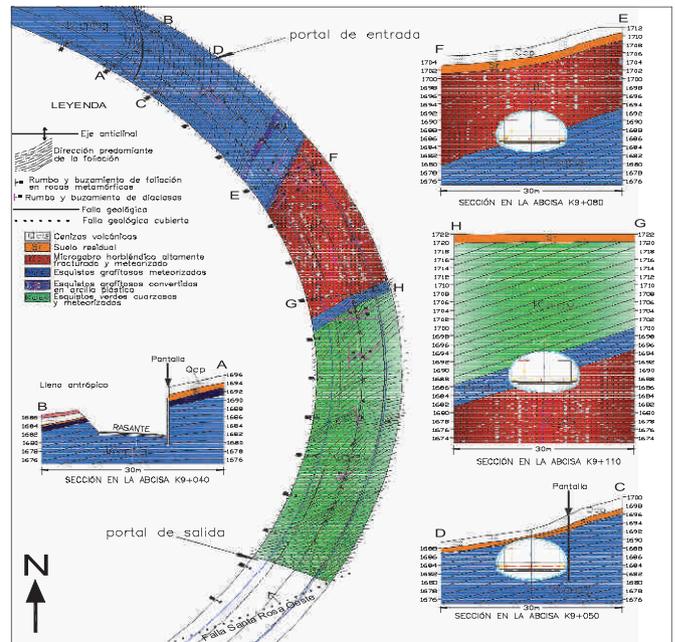


Figura 5. Mapa geológico del interior del túnel

alta competencia original de la roca antes de meteorizarse, que al no poder plegarse ante los esfuerzos, se fractura, lo que no ocurre con las unidades de esquistos, ya que algunas de las fracturas se convierten en fallas de buzamiento siguiendo los planos de foliación, y la respuesta general de los esquistos ante los esfuerzos es a plegarse antes de fracturarse.

4. ASPECTOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL Y GEOTÉCNICO

El aspecto de diseño fue basado en las siguientes premisas:

- Solución de los portales de entrada y salida, mediante metodologías que permitieran mantener la estabilidad general del macizo de suelo en todo momento, dada la importancia de la obra en sí y del puente (Helicoidal) ya construido, además de la necesidad de conservar en forma absoluta la estabilidad de la zona, debido a su alta incidencia desde todo punto de vista, incluyendo la parte ambiental.
- Solución del tema de excavación subterránea para un túnel de baja cobertura en terreno blando, que atraviesa un macizo de las condiciones geológicas observadas, con una metodología que permitiera su ejecución con tecnología netamente local y la utilización de recursos de origen nacional, en su mayoría.
- Diseño con el criterio de control de deformaciones máximas permisibles, para obtener una estructura de una flexibilidad adecuada que permitiera la formación de un anillo de plastificación circundante

contribuyente que, en conjunto, con un solo revestimiento, lograra el cometido de obtener una estructura segura, durable y estéticamente aceptable, dentro de rangos económicos también convenientes.

El proyecto contempla dos problemáticas diferentes para el apertamiento de entrada y el de salida, que presenta, para el primero, la necesidad geométrica de contener hasta 22 metros de talud en su margen derecha, para evitar la desestabilización del área, donde está cimentado un puente helicoidal. Esta circunstancia obligó a diseñar una contención que fuera posible de ser ejecutada de la parte superior hacia la inferior, garantizando la estabilidad del talud durante todo el período de construcción y, en forma adicional, a largo plazo.

Fue así como se concibió un muro constituido por pilotes circulares de 1.60 m. y profundidades comprendidas entre los 10 y 25 m. Estos pilotes fueron diseñados de tal manera que su parte inferior y la sobresaliente en voladizo, mientras se adelanta la construcción, garantizara la estabilidad del talud en forma progresiva, mientras se construía el atensoramiento y la pantalla final respectiva (ver figura 6).

Tanto en el portal de salida, como en el de entrada, se utilizaron vigas anillo con contención circular en la periferia e inclinadas a los ángulos de seguridad adecuados (2 horizontal y 3 vertical para el de entrada, y 2 horizontal y 1 vertical para el de salida) (ver figura 7).

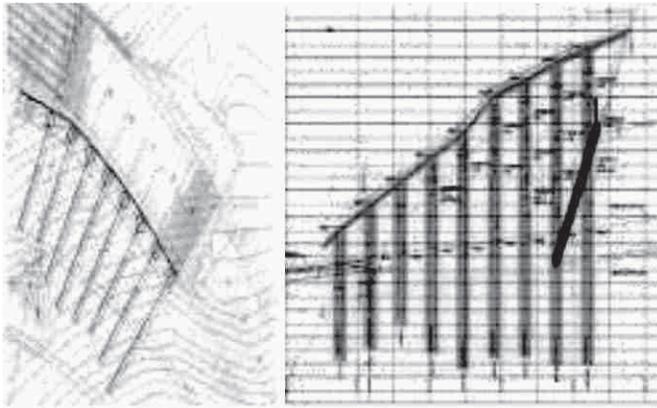


Figura 6. Vista en planta (izquierda) y perfil del sistema de contención en el portal de entrada.

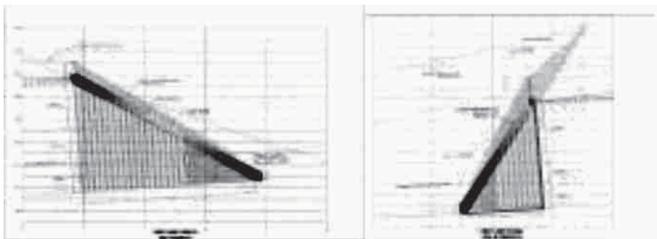


Figura 7. Sección de las vigas anillo con contención circular, usada en los portales del túnel.

Para efectos del diseño, fueron utilizados los parámetros geotécnicos que se observan en la tabla 1 (Ver).

Tabla 1. Parámetros geotécnicos usados en el diseño del túnel

SONDEO	MUESTRA	PROF.	DESCRIPCION	SUCS	% P.200	v (t/m ³)	v _h (t/m ³)	Wn (%)	IP	LP (%)	LL (%)	C (10°) MPA	φ (grados)	σ _v (10°) MPA
S-15A	2	2-4m	Limo Arcilloso Arenoso con pedras amarillas, café grisáceo oscuro			1.53	0.94	62.6				6	23	77
S-15A	4	6-8m	Limo Arcilloso Arenoso Fino			1.58	0.94	69.2				6	22.2	97
S-15A	6	10-12m	Limo Arcilloso Arenoso Verdoso			1.79	1.3	39.2				12	30.6	162
S-16	1	1.1-4.0m	Limo Arcilloso Arenoso Verdoso	MH	71.2	1.09	1.02	64.3	14.3	56.9	73.7	24.3	18	136.3
S-16	2	1.10-4.10m	Limo Arcilloso Arenoso Verdoso	MH	51.3			46.1	5	38.9	43.8			
S-16	3	5.10-4.45m	Saprimo, café gris amarillento					26.7	5.7	24.9	30.0			
S-16	4	7.30-7.10m	Saprimo, café gris amarillento					30.2	8.8	22.1	35.9			
S-16	5	9.50-9.0m	Roca Metasedata											
S-17	1	1.90-3.00m	Limo arcilloso arenoso, café amarillento	MH	71.2	1.15	1.1	59.6	22.3	59.3	72.8	54.6	22	68.6
S-17	2	3.90-4.95m	Limo arcilloso arenoso, café amarillento	MH	70.4	1.53	0.90	59.7	18.4	57.4	70.8	21.9	20	34.3
S-17	3	6.90-6.00m	Limo arcilloso arenoso, café amarillento	MH	54.6	1.88	1.26	35.6	10.5	37.1	42.8			29.8
S-17	4	6.90-48.0m	Roca											

El aspecto teórico para los túneles fue enfrentado para efectos de predimensionamiento de los sistemas de soporte mediante métodos empíricos tales como los propuestos por Bieniawski y Barton, en los años 70, y analizado mediante métodos analíticos (elementos finitos) contenidos en software especializado.

Según lo anterior, se llegó a la conclusión de la necesidad de utilizar un espesor de 27 cm de concreto lanzado con fibra metálica y polimérica externa, con resistencia que podría variar entre 25 Mpa y 35 Mpa, según la zona a resolver, que a su vez embebió cerchas en acero redondo grado 60, soldadas con soldadura de bajo contenido de hidrógeno, tipo 9018G, y conformadas por tres varillas de E1", en celosía, tal como se ve en el dibujo adjunto, que prestaron en su inicio, y mediante la metodología de excavación escogida, el soporte inicial necesario para cada una de las etapas de excavación y construcción, para finalmente quedar siendo parte del sistema definitivo de soporte (ver figura 8).

El análisis mediante elementos finitos con sistemas computarizados permitió conocer, antes de la excavación, aquellos sitios en los que se pudieran presentar no solamente desplazamientos, sino también deformaciones al interior del túnel, que fueron tenidos en cuenta durante la construcción (ver figura 9, página siguiente).

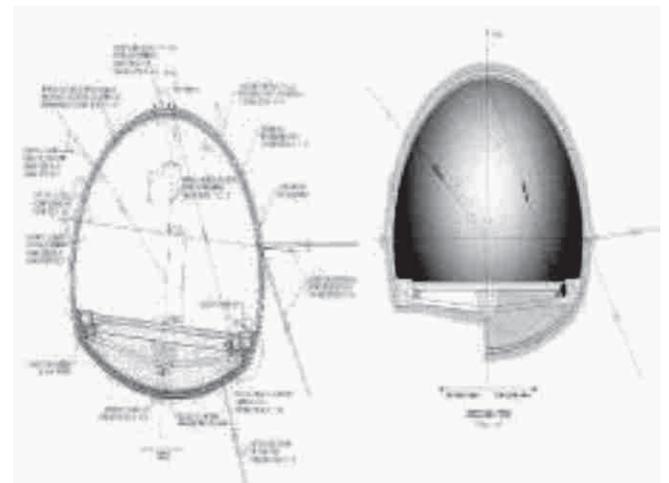


Figura 8. Sección transversal del túnel ilustrando todas sus características de diseño y construcción.

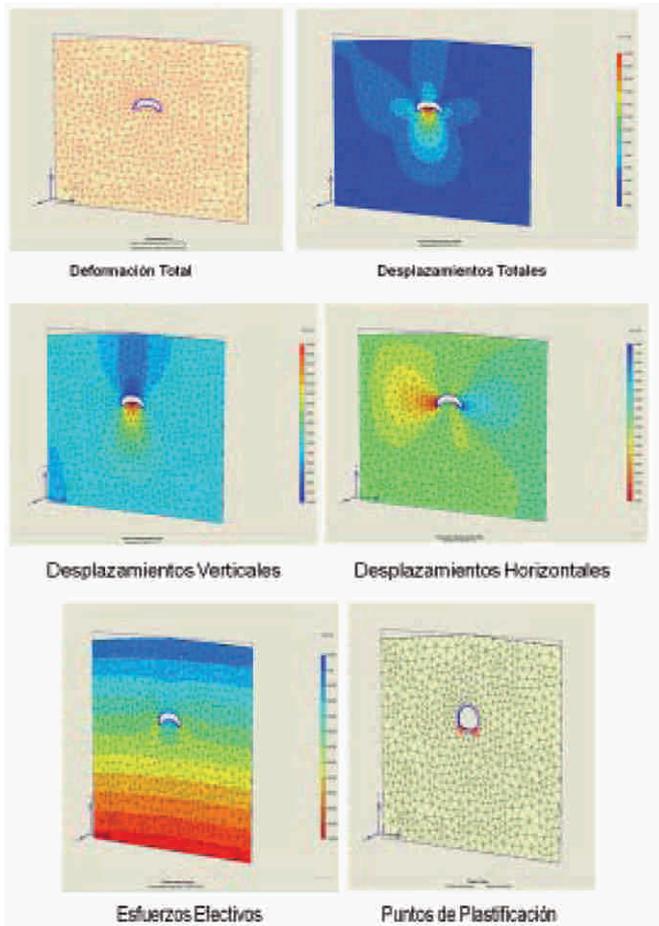


Figura 9. Imágenes obtenidas mediante análisis de elementos finitos donde se muestran algunas posibilidades de deformación al interior del túnel.

5. METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN

Con los trabajos de geología de campo, se pudo notar que, en la vertiente donde se localiza el portal de entrada, los esquistos están inclinados a favor de la pendiente y que, para prevenir la generación de movimientos de masa tan pronto se hicieran las primeras excavaciones que dan acceso al túnel, se diseñaron y construyeron siete *caissons* de 1,60 m de diámetro y de 10 a 25 m de profundidad, a los cuales se les adosó una pantalla anclada en concreto, vaciada de arriba hacia abajo, antes de iniciar las excavaciones del portal.

Una vez construida la pantalla, se procedió a instalar un sistema de enfilaje sobre la corona del portal, con tubería de acero de 3" de diámetro y 9 m de longitud, inyectando con lechada. A continuación, se construyó una viga de preanillo reforzada, embebiendo los tubos de enfilaje (ver figura. 10). A partir de este punto, se inició la excavación del túnel por la sección superior, mediante excavación manual y removiendo la cuña con excavadora.

Para el portal de salida, se realizó un proceso similar, pero sin construir *caissons* y pantalla anclada. El portal de salida tiene una connotación adicional y es la de



Figura 10. Aspecto de las vigas preanillo durante la construcción (izquierda) y luego de terminadas.

construirse la viga de preanillo casi sobre el terreno descapotado, para prevenir cualquier movimiento de masa o inestabilidad, ya que la zona en la cual se construyó está constituida por una serie de derrumbes, como ya se mencionó antes.

La excavación se inició por el portal de salida, mientras se construía el muro pantalla; luego, por ambos portales, en avances de 50 cm y, cada vez que se avanzaba esta cantidad, se colocaba un arco y se sostenía con concreto lanzado adicionado con fibras metálicas; luego se excavaban otros 50 cm, y así sucesivamente. Es importante señalar que el concreto lanzado para sostenimiento, adicionado con fibras metálicas, se especificó para tener una resistencia de 10 Mpa. a las 24 horas, 16 Mpa. a tres días y 25 Mpa. a 28 días. El de revestimiento adicionado con microfibras de polipropileno se especificó para tener una resistencia de 25 Mpa. a 28 días. La fibra metálica usada fue tipo Dramix RC 65/35 R 45 y la microfibra de polipropileno fue del tipo Sikafiber AD de 19 mm.

Una vez realizado el cable en la sección superior, se inició el proceso de excavación en la sección inferior, por ambos frentes, ejecutando avances de 2 m, en forma alternada, por cada hastial. Tan pronto se tenía una sección completa, cerchas y lanzado de sostenimiento, se procedía a excavar la solera y se cerraba la sección, llenando con concreto convencional. Por condiciones geotécnicas, hubo necesidad de reforzar la solera con cerchas en celosía, en las zonas de los portales y en una zona en la que se tiene muy cerca del hastial derecho el *caisson* de fundación de una de las pilas que sostienen el puente helicoidal. Durante el proceso de construcción de la sección superior y la inferior, se iba instalando un sistema de instrumentación (argollas) cada 5 m., para el chequeo de la convergencia, y puntos de control topográfico, al interior y exterior, para verificar asentamientos. Durante el proceso constructivo, los movimientos registrados estuvieron dentro de los

parámetros establecidos en el diseño, y se registraron las mayores deformaciones cuando se inicio el proceso de excavación de los hastiales, y se estabilizaban cuando se cerraba la solera.

6. CONCLUSIONES

A partir los datos obtenidos, se puede afirmar que, esencialmente, en los frentes de excavación que fueron realizados en sentido contrario a la foliación, se produjeron sobreexcavaciones de tipo inevitable, principalmente, debido a que los buzamientos promedio de cada uno de los sectores en cuestión se presentaron de manera sub horizontal.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Sociedad Concesionaria “Autopistas del Café S.A.”, por el permiso otorgado para

publicar datos relacionados con el proyecto vial Armenia-Pereira-Manizales.

8. REFERENCIAS

- NARANJO, J.L. (2005). Modelo de evolución morfotectónica del sistema de fallas de Romeral entre el río Otún (Risaralda) y Filadelfia (Caldas). Cuadernos de Investigación. No. 12. Universidad de Caldas. 133p.
- SUÁREZ, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos. Publicaciones UIS. 548 p. Bucaramanga.