

Incluido en la Supercarretera Durango-Mazatlán, tramo Las Adjuntas-Puente Río Baluarte

Construcción del *Túnel de Frijolar Nuevo* (Estado de Durango, México)

El presente artículo pretende definir las características y el método de ejecución del túnel de *Frijolar Nuevo* situado en el tramo de la Supercarretera Durango- Mazatlán, contratado por la empresa *Aldesa y Omega*, que va desde Las Adjuntas a Puente Río Baluarte en el estado mexicano de Durango. El tramo consta de 70 km de carretera y engloba la excavación de 23 túneles que realiza para ambas empresas. El túnel de Frijolar, que consta de 230 m de túnel en mina, se encuentra dentro del tramo de *Aldesa* y ha sido excavado por *Proacón México S.A. de CV*. Se dio por concluida su excavación el 5 de mayo de 2011.

El Túnel de Frijolar tiene una longitud en mina de 230 metros lineales y se encuentra situado entre el pk 145+830 del portal Durango y el pk 146+060 del portal Mazatlán, con una sección total de 123 m², dando lugar a una excavación de 15,1 m de ancho por 9,77 m de alto.

Una vez finalizado alojará tres carriles de la Supercarretera, un carril para cada sentido de la circulación, y un arcén de 1,5 m en cada sentido, que permitirá en un futuro poder desdoblarse el sentido de ascenso de la carretera.

Geología y geotecnia del macizo rocoso

Como parte de los trabajos de seguimiento a la aplicación de los proyectos ejecutivos de 58 túneles que se construyen en el tramo *El Salto - Concordia* de la *Carretera Durango-Mazatlán*, en los Estados de Durango y Sinaloa, y en particular del Tramo I, además de los recorridos diarios que se realizan por personal del consorcio *Consultec-Triada*, se realizó un reconocimiento geológico para identificar y cartografiar las diferentes unidades expuestas durante el avance de la excavación, así como levantar datos estructurales para poder identificar las principales discontinuidades y definir la existencia de estructuras geológicas mayores. Se interpreta un modelo geológico para ser correlacionado con las características geotécnicas observadas e inferir el comportamiento del macizo rocoso para efectos del diseño de proyecto.

Localización y caracterización del sitio

El túnel *Frijolar Nuevo* se ubica en los cadenamientos 145+830 al 146+060 de la *Carretera Durango - Mazatlán*, localizándose cercano a uno de los afluentes del Río de la Ciudad.

Hidrogeológicamente, la zona se encuentra ubicada en la Provincia de la *Sierra Madre Occidental*. Las condiciones climatológicas son de húmedo templado con lluvias todo el año en las partes altas de la sierra, siendo la precipitación principalmente de tipo orogénico donde la lluvia es mayor que 1,600 mm/año. La temperatura media anual varía desde 12° C en zonas altas a 22° C en las áreas bajas.

Geología regional

La zona del túnel se encuentra ubicada dentro de la provincia fisiográfica de Sierra Madre Occidental y dentro de la provincia geológica denominada como *Faja Ignimbrítica Mexicana*, en donde se ha documentado la existencia de dos grandes secuencias de rocas ígneas, ambas de naturaleza cálcico-alcalina conteniendo ignimbritas (**Fig. 1**).

Una secuencia inferior que contiene abundantes intrusivos y rocas volcánicas de composición intermedia, y una secuencia superior formada principalmente por ignimbritas riolíticas originadas a partir de numerosas calderas. Estos dos grupos, que están sobrepuestos a lo largo de casi toda la Sierra Madre Oc-

Palabras clave: EXCAVACIÓN, GEOLOGÍA, GEOTECNIA, JUMBO, PERFORACIÓN, SOSTENIMIENTO, TÚNEL, VOLADURA.

Antonio ALONSO JIMÉNEZ, Dtr. General (*); **Rubén RODRIGUEZ LAVIANA, Jefe de Túnel (*)**; **Francisco SUAREZ FINO, Dtr. de Proyecto(**)**; **Gonzalo CONDADO BERNAL, Jefe de Proyecto (**)**.

(*) PROACON MÉXICO, S.A. DE C.V.
() CONSULTEC INGEN. ASOCIADOS, S.C.**

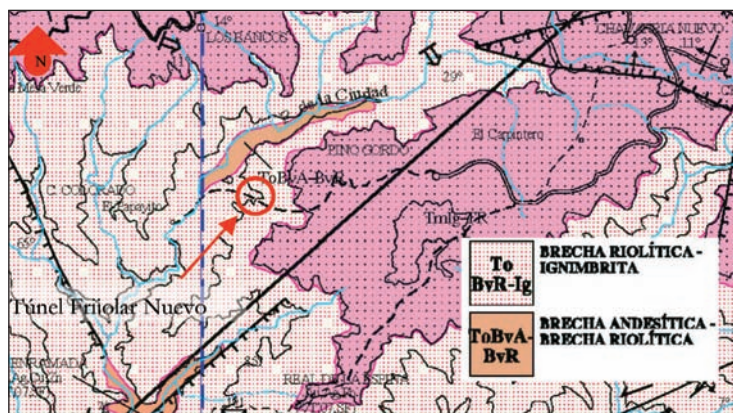
cidental, muestran en su contacto una fuerte discordancia.

Estratigrafía

El basamento mesozoico está establecido en función de los *Terrenos Guerrero y Parral*. Este último, teniendo como base una secuencia de metaareniscas y pizarras, y una similitud litológica con los afloramientos de la localidad de Copala. Cubre discordantemente un conglomerado basal polimíctico constituido por fragmentos de pizarra y cuarzo metamórfico de edad tentativa Necomiano. Sobreyaciendo aflora un paquete de andesita metamorfozada correspondiente a una secuencia volcánica marina.

Superpuestas a estas últimas por discordancia angular se observa una secuencia volcánica correspondiente al *Grupo Volcánico Inferior* constituida por derrames y brechas volcánicas de composición andesíticas que por correlación se ubica de edad Paleoceno-Eoceno.

Discordantemente se tiene un conglomerado polimíctico compuesto por fragmentos de andesitas, ignimbritas y riolitas definido infor-



[Figura 1] .- Geología regional de la zona del túnel *Frijolar Nuevo* (pk 145+830 al 146+060). Modificado de la *Cata El Salto, F13-2, 1:250.000, CGM, México 2000*.

malmente como *Conglomerado Las Palmas*. Sobreyaciendo discordantemente se depositaron brechas coignimbríticas que constituyen los centros de emisión volcánica del Oligoceno temprano. Estos depósitos son cubiertos concordantemente por un paquete de brechas volcánicas riolíticas e ignimbríticas de la Secuencia Volcánica Superior del Oligoceno.

Todas las unidades anteriormente descritas han sido afectadas por el emplazamiento de cuerpos intrusivos de composición granítico-granodiorítico que forman parte del *Batolito de Sinaloa*.

Marco tectónico

Se presenta el inicio de la evolución tectónica con la generación del arco magmático del Jurásico superior que constituye las rocas del *Basamento Guerrero*, el cual presenta fases de deformación con desarrollo de foliación, pliegues y zonas de cabalgaduras; posteriormente su migración hacia el oriente genera otro arco durante el Cretácico temprano paralelo al depósito y relleno de la Cuenca Mesozoica de México.

Durante el Cretácico tardío la Orogenia Larámide originó el crecimiento y la deformación de las secuencias cretácicas, así como la reactivación de fallas de basamento con orientaciones generales de NW-SE y otros dos sistemas secundarios NW-SE y N-S.

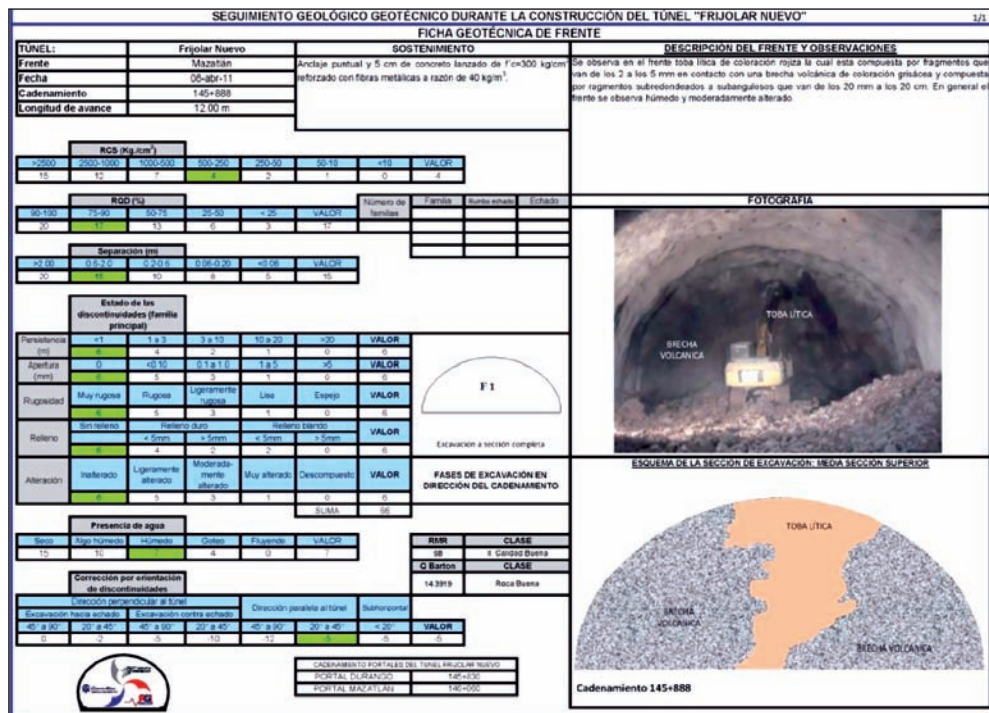
Durante el Mioceno se desarrolló una fase extensional asociada a la apertura del Golfo de California, la cual provocó una serie de fallas horizontales con dirección NW-SE que delimitan fosas y pilares tectónicos que oscilaron las secuencias volcánicas terciarias, siendo estas fallas zonas de debilidad en donde se emplazaron cuerpos volcánicos y domos, así como emisiones fisurales de carácter basáltico.

Sismicidad

La República Mexicana se dividió en cuatro zonas sísmicas para fines de diseño antisísmico. Para establecer una diferenciación se utilizaron los catálogos de sismos, grandes sismos que aparecen en los registros históricos y los registros de aceleración del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos en este siglo. Estas zonas son un reflejo de la frecuencia de los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo a esperar durante un siglo. El túnel se ubica en la *zona B*, marcada como una área intermedia, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.

Geología local

De acuerdo con la ficha geológico-geotécnica del frente expuesta, en el inicio de la excavación por el *Portal Mazatlán*, en la parte superior del frente se observó una brecha com-



■ Ficha geotécnica del frente del túnel Frijolar Nuevo.

puesta por fragmentos líticos angulosos que van de los 5 mm a los 20 cm, presentando una coloración gris clara y en porciones rosáceo claro. En la parte inferior se observa un cuerpo dolerítico intrusivo el cual presenta una coloración gris oscura y de granulometría fina. Posteriormente se observa un contacto con una riolita de coloración rosácea la cual se encuentra húmeda y moderadamente alterada. Nuevamente se encuentra en el frente la brecha volcánica antes descrita en contacto con una toba lítica de coloración rojiza la cual está compuesta por fragmentos que van de los 2 a los 5 mm. En general, el frente aparece húmedo.

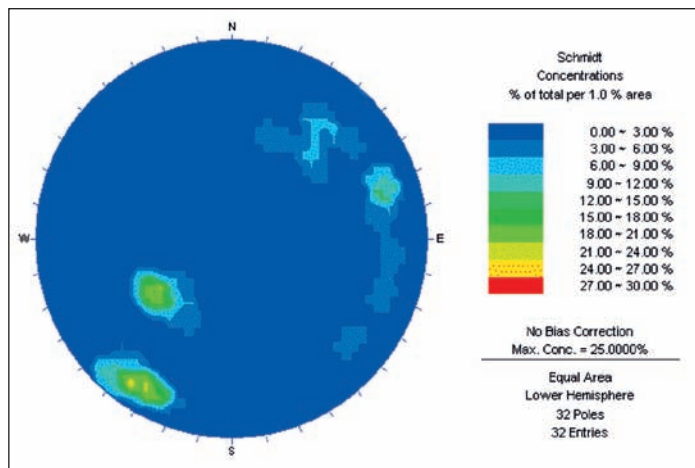
Con respecto a la clasificación geomecánica propuesta por *Bieniawski RMR*, la calidad geotécnica del material es de *clase II* siendo

de *Calidad Buena*, y con un *RMR* medio de 61 a 80.

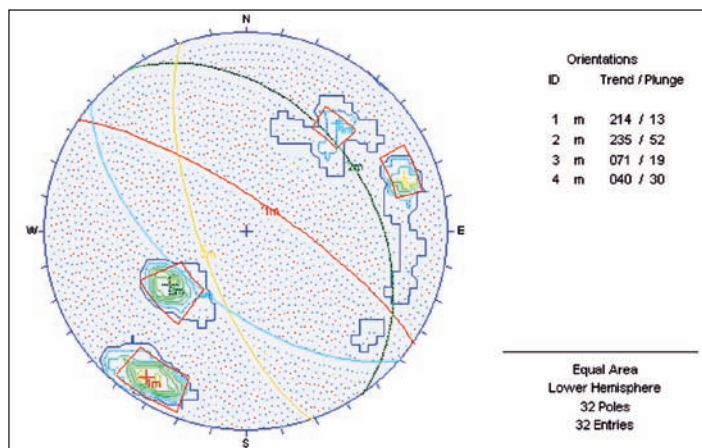
A medida que se han llevado a cabo los trabajos de excavación en el *Portal Mazatlán*, se ha elaborado un registro de la orientación de los planos de fracturamiento. Hasta el momento el registro consta de 32 datos estructurales.

Estos se han expuesto gráficamente en estereogramas con el objetivo de determinar las direcciones preferenciales. Como resultado se tienen las *Figs. 2 y 3*, las cuales reflejan cuatro familias preferenciales de fracturamiento cuyos datos estructurales son los siguientes:

- Familia 1 = 214°/13°
- Familia 2 = 235°/52°
- Familia 3 = 071°/19°
- Familia 4 = 040°/30°



■ [Figura 2]. - Estereograma que muestra la densidad de los polos en el portal Matzatlán.



[Figura 3].- Estereograma que muestra las familias predominantes de los planos de fracturamiento en el portal Mazatlán.



[Figura 4].- Portal Durango del túnel Frijolar Nuevo.

Fases de excavación y sostenimiento

Excavación

El *túnel de Frijolar* se excavó siguiendo la técnica denominada *Nuevo Método Austriaco (NATM)*, en el cual se finaliza por completo el sostenimiento de un pase de excavación antes de iniciar el siguiente, uniéndolo al anterior y haciendo un todo uno que facilita la transmisión de tensiones a la totalidad del sostenimiento ya colocado y teniendo únicamente como terreno en conflicto la longitud del pase excavado que varía dependiendo de la calidad del macizo entre 1 y 5 m.

La excavación se realizó mediante perforación y voladura con ayuda de medios mecánicos. Se excavó la totalidad del túnel a sección completa ya que la buena calidad del terreno lo permitía. Así pues, al contrario que en la mayoría de los túneles donde se excava primero la media sección o sección de *avance* para, una vez juntado o calado el túnel excavar la otra media sección o sección de *destroza*, aquí se excavaron las dos secciones al mismo tiempo teniendo una sección de excavación total de 123 m².

Emportalamientos

El *túnel de Frijolar* se inició desde el portal de salida o *portal Mazatlan*. Debido a la buena calidad del terreno se colocó un enfilaje ligero que constaba de 65 barrenos de 9 m de longitud rellenos con varilla de acero corrugado de 1" inyectado con hormigón. Este enfilaje refuerza y facilita la excavación en los primeros metros del túnel.

En el *portal Durango* o portal de entrada (*Fig. 4*), se colocó un enfilaje idéntico, pero a diferencia del anterior, éste se realizó desde el interior del túnel para facilitar la terminación o cale desde el interior, puesto que la excavación se realizó totalmente, de principio a fin, desde la boca de salida.

Perforación

Se ataca la excavación iniciándose con una perforación de barrenos para posteriormente cargar y detonar la voladura.

Los barrenos tenían un diámetro de 51 mm, los barrenos cargados, y de 104 mm los barrenos vacíos. La perforación de los mismos se realizó con un jumbo *Tamrock DT 820* de dos brazos y semiautomático (*Fig. 5*).

Debido a la característica volcánica de la roca, altamente abrasiva, hubo un consumo de material de perforación, principalmente bocas de perforación, un 60% por encima de lo normalmente estimado.

Se perforaron 162 barrenos por voladura con un cuele de cuatro escariados para facilitar la salida del mismo y poder extraer con la voladura la totalidad de la perforación. Los barrenos de recorte se perforaron con una inclinación del 5% a fin de evitar sobreexcavaciones.

Se obtuvo un volumen de sección real de excavación de 3063,12 m³ frente al volumen teórico de excavación de 2594,81 m³, lo que hace un 18% de exceso sobre el teórico. Se asume normalmente en excavación de túneles por perforación y voladura una sobreexcavación de un 30%, con lo que puede considerarse que la excavación se ha realizado de forma notable.



[Figura 5].- Perforación a sección completa del túnel Frijolar Nuevo.



[Figura 6].- Recorte marcado de la nueva perforación, donde se observa lo ajustado del recorte conseguido en la excavación.

Carga y disparo de la voladura

Una vez concluida la perforación de los barrenos se retira el jumbo procediéndose a continuación a la carga y disparo de la voladura.

Se utilizó como explosivo la modalidad denominada **Tobex**, que es una emulsión de poder rompedor ligeramente menor a la de la goma dos, y detonadores no eléctricos tipo **Primadet**. Se usaron detonadores de microretardo para el cuele y los barrenos centrales y detonadores de retardo para el contorno. Para conectar la voladura se usó cordón detonante de 6 g/m como es habitual con este tipo de detonadores.

Se perforó a una longitud de 4,5 m, alcanzándose con la voladura 4,1 m y con el saneo posterior con martillo hidráulico los 4,25 m totales. Se obtuvo un coeficiente de aprovechamiento de explosivo de 0,989 kg de explosivo por m³.

Ventilación

Después de la voladura se deja el tiempo necesario para que se eliminen los humos producidos en la misma. Transcurrido el tiempo requerido para la correcta evacuación de los humos, se procede a introducir los equipos de desescombro.

Para la ventilación del *túnel de Frijolar* se utilizó un ventilador **Zitron** de 75 KW con manga de ventilación de 1200 mm. No hubo problemas de ventilación durante la excavación, aunque la altura a la que se trabaja –2300 m— obligó a aumentar la sección de la manga para reducir la fricción y optimizar el rendimiento del ventilador, ya que la altura afectaba a la densidad del aire y, por tanto, al rendimiento del ventilador.

Desescombro

Una vez que se ha realizado la excavación acorde con la longitud de pase adecuada a

las características geomecánicas del terreno excavado, se procede al desescombro. Este se realizó mediante pala cargadora **Caterpillar 950** y dos camiones articulados **Terex** de 30 toneladas. Se obtuvo un rendimiento de 5,5 horas de media para la extracción del escombro de la voladura.

Saneo

Una vez concluido el desescombro es necesario reperfil la excavación con martillo hidráulico a fin de eliminar todas las rocas sueltas y obtener el contorno final de excavación para posteriormente colocar el sostenimiento. Para esta labor se utilizó una excavadora **Cat 330** con martillo hidráulico **Atlas Copco HB 2500**, con un tamaño mayor del que normalmente se utiliza en túneles debido al gran tamaño de la sección excavada.

Sostenimiento

En el *túnel de Frijolar* se colocaron tres tipos de sostenimiento definidos por proyecto según el tipo de **RMR** que presenta el macizo rocoso.

Para los emportalamientos se colocó sostenimiento tipo **ST-E** en los 10 m iniciales y finales del túnel. Este sostenimiento consta de enfilaje ligero, cuadros metálicos **IPR10** colocados a un metro de separación entre ellos y 15 cm de hormigón proyectado **HP-30** con 40 kg de fibra metálica por m³.

El 60% de la excavación se realizó colocando sostenimiento **ST-3** que consta únicamente de bulones o anclas tipo **swellex** de 4 m de longitud en malla de 2 x 2 m y 10 cm de hormigón proyectado.

El resto de excavación se realizó, debido a la muy buena calidad de la roca, con **RMRs** por encima de 70, colocando sostenimiento **ST-1** únicamente con bulones ocasionales y 5 cm de hormigón proyectado.

Para el lanzamiento de hormigón proyectado

se utilizó un robot de gunitado **Putzmeister PM500**.

Rendimientos

El avanzando se desarrolló en torno a los 4,1 m por ciclo. El ciclo completo de perforación, voladura, desescombro y colocación de sostenimiento para el túnel de Frijolar anduvo en torno a las 18 h repartiéndose como sigue:

- 4,5 h de perforación.
- 2 h de carga de voladura.
- 0,5 h de ventilación.
- 6 h de desescombro.
- 1,5 h de saneo.
- 2 h de colocación de sostenimiento.
- 1 h de lanzamiento de concreto.
- 0,5 h de topografía.

Surgieron problemas de abastecimiento de agua por encontrarnos en la época seca de la región. Para remediarlo fue necesario colocar más de 3 km de tubería de canalización para agua. También se dieron los problemas propios del lugar, es decir, realizar una obra en medio de Sierra Madre a una altura de más de 2.000 m sobre el nivel del mar y a 200 km de la ciudad más próxima.

Con todo, la excavación del túnel se inició el 5 de marzo de 2011 y se terminó el 5 de mayo de 2011.



PROACON, S.A.

Dirección Técnica

Bahía de Pollensa, 13 • 28042 Madrid

Tel: +34 917 721 700

Fax: +34 917 732 120

info@proacon.es

www.proacon.es