

La construcción de los *túneles de Toquepala*. Mina Toquepala, Tacna, Perú

Dentro del área geográfica de la *Mina Toquepala*, en el distrito de Ilabaya, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna se han ejecutado dos túneles de 2.063 y 154 m de longitud, con una anchura funcional de 7,20 m para dar cabida a una cinta transportadora y un carril de circulación de tráfico rodado. Esta actuación se enmarca dentro del proyecto de mejora tecnológica del sistema de transporte de mineral en el conjunto de la mina. El presente artículo expone las características constructivas y de diseño de ambos túneles.

El yacimiento minero de *Toquepala*, se encuentra ubicado en el Sur del Perú, en el Departamento de Tacna entre las cotas 3,100 a 3,600 msnm. La explotación se desarrolla por parte de la empresa *Southern Peru Copper Corporation*. La producción minera es principalmente cobre aunque también se producen cantidades en menor escala de molibdeno y otros minerales.

Southern Peru Copper Corp. es la compañía minera más grande del Perú y una de las diez principales empresas cupríferas del mundo. Opera en Toquepala desde hace más de 50 años y se ha convertido en el productor integrado de cobre más grande del Perú, lo que significa uno de los mayores productores de cobre del mundo.

El contrato de ejecución de las obras subterráneas contenidas en el plan de mejora del transporte fue adjudicado a la empresa *Obras Subterráneas (OSSA)* en modalidad de *EPC*, estando la ingeniería, tanto de diseño como durante la fase de construcción, a cargo de *Subterra Ingeniería*.

Los túneles, ubicados en el entorno de mina, se encuadran dentro de una actuación de mejora de las infraestructuras de transporte en el conjunto de la misma, han sido excavados mayoritariamente en riolitas y andesitas de buena calidad geotécnica, con un índice *RMR* normalmente superior a 50 puntos excepto algunas zonas en el túnel largo asociadas a unidades intrusivas (Diatremas y/o chimeneas volcánicas, pórfidos, brechas de turmalina y diques).

Los túneles se construyeron siguiendo el *NATM (Nuevo Método Austriaco)*, a sección completa con una sección de excavación de 35 m² y una longitud de pase variable de 1 a 6 m. Durante los trabajos de excavación de los emboquilles, se retiraron algunos materiales coluviales, materializándose los afrontamientos de los túneles en andesitas y riolitas previa ejecución de paraguas de sostenimiento de 9,0 metros de longitud. El sostenimiento de los taludes se ejecutó mediante bulones, drenes californianos y hormigón proyectado para los taludes de tipo definitivo y únicamente mediante hormigón proyectado para los de carácter temporal.

La excavación del túnel largo se ejecutó mediante dos frentes de avance y comenzó en septiembre de 2011. Las obras de excavación finalizaron en marzo de 2012, con un promedio de avance de en torno a 300 m/mes considerando los dos frentes. La excavación del túnel corto se llevó a cabo durante el mes de Abril de 2012.

El contrato de ejecución de las obras subterráneas contenidas en el plan de mejora del transporte fue adjudicado a la empresa *Obras Subterráneas (OSSA)* en modalidad de *EPC*, estando la ingeniería, tanto de diseño como durante la fase de construcción, a cargo de *Subterra Ingeniería*.

Geología y Geotecnia

El yacimiento minero de *Toquepala* se encuentra ubicado en el sur del Perú, en el Departamento de Tacna, se trata de una región de topografía accidentada, debido a innumerables quebradas profundas que en su recorrido des-

Palabras clave: INFRAESTRUCTURA MINERA, GEOTECNIA MINERA, OBRAS SUBTERRÁNEAS, TÚNELES.

Adolfo SICILIA⁽¹⁾, Iñigo NUÑEZ⁽¹⁾, José Miguel GALERA⁽²⁾, Daniel SANTOS⁽²⁾

(1) OBRAS SUBTERRÁNEAS, S.A.

(2) SUBTERRA INGENIERÍA, S.L.

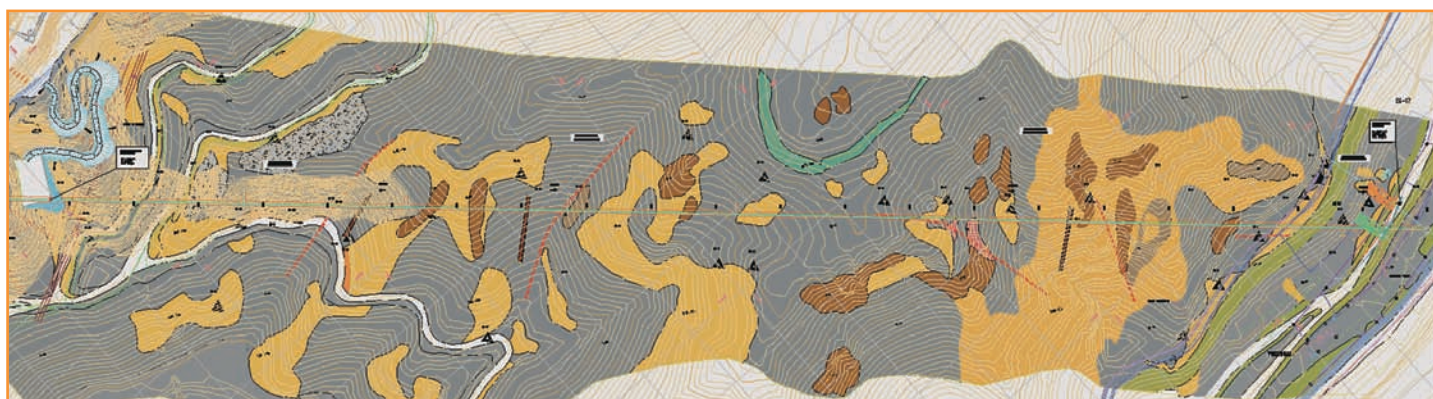
de la sierra hacia los desiertos de la costa, corren transversalmente el flanco occidental de los andes sur-occidentales

Geológicamente, *Toquepala* constituye un yacimiento porfirítico de cobre molibdeno disseminado, donde la mineralización está subordinada a una chimenea de brecha y a un intrusivo de dacita, ambos genéticamente relacionados a la actividad intrusiva hidrotermal calco alcalina datada de fines del Cretáceo superior - Terciario inferior. El yacimiento de *Toquepala* junto con *Quellaveco* y *Cuajone* pertenece al metalotecto denominado *Sub Provincia Cuprífera del Pacífico* que tiene dirección NW-SE en Perú y N-S en Chile.

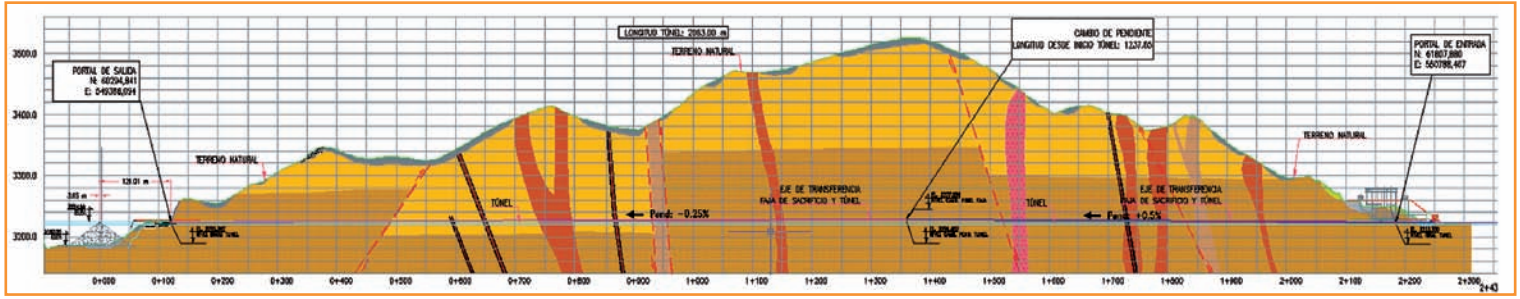
a) Datos geológicos

En la *Fig. 1* se muestra la cartografía geológico-geotécnica realizada, los macizos rocosos presentes en el área de estudio están conformados por rocas ígneas de origen volcánico (riolitas y andesitas), e intrusivo (brechas de turmalina, diques y pórfidos) que se encuentran cubiertas de manera parcial o total por depósitos cuaternarios tales como coluviales, aluviales y residuales. A continuación se describen las unidades litológicas reconocidas en el área de estudio:

- **Riolitas Toquepala (KsTi-Ttr).** Se trata de secuencias de roca volcánica de textura afanítica, de colores claros. Se presentan con formas de ondulaciones suaves y presentan



■ [Figura 1].- Mapa geológico geotécnico del túnel largo de Toquepala.



[Figura 2].- Perfil longitudinal geológico del túnel largo de Toquepala.

brechas de matriz silícica con bandeamiento fino, a manera de flujo y cristales de feldespatos. En el área de estudio se aprecian variaciones de esta unidad conforme a la textura y aspecto en el que se presenta, tales como; riolitas de aspecto tufaceo, riolitas de grano medio a grueso, riolitas de aspecto fluidal y riolitas porfíricas con granos de cuarzo y pirolusitas en fracturas, estas riolitas se encuentran como basamento rocoso predominante en forma de pseudo estratos con niveles delgados de andesitas gris oscuras. También son intruidas por diques, diatremas y pórfidos.

• **Andesita Toquepala (KsTi-Tta).** Se trata de secuencias de rocas volcánicas de textura afanítica, de color gris oscuro a gris claro, se presentan en capas sub-horizontales conjuntas con las Riolitas Toquepala a manera de niveles, sus minerales esenciales son cristales de feldespatos y ferromagnesianos.

• **Rocas Intrusivas.** Formadas por intrusiones abisales, diques, brechas de turmalina, pequeños stocks, diatremas y cuellos volcánicos del Terciario inferior (Ti-de), correspondiente al segundo de tipo de intrusión con emplazamientos sucesivos de cuerpos menores, estas estructuras de intrusión contienen venillas, bandas y granos de turmalina e intruyen el basamento rocoso volcánico de riolita y andesita.

• **Depósitos Cuaternarios.** Se trata esencialmente de depósitos coluviales (Q-co) y residuales (Qr-rs) en forma de escombros en laderas y en depresiones cubriendo el basamento rocoso riolítico. También se encuentran depósitos de material removido de origen antropico. Como rellenos no consolidados (Qr-re) y material antropico de desmonte (Qr-ds).

La Fig. 2 muestra el perfil geológico longitudinal del túnel largo donde se puede observar que la mayor parte del túnel se excavó en andesitas y riolitas. Asimismo se pueden observar diversas zonas de debilidad del macizo rocoso relacionadas con la formación de brechas y áreas de fracturación intensa.

b) Datos geotécnicos.

Con el objeto de partir de hipótesis realistas en cuanto al comportamiento tenso-deformacional del macizo rocoso de implantación de los túneles durante la fase de proyecto se desarrollaron sendos estudios geotécnicos mediante los cuales se obtuvo un modelo geotécnico del trazado de cada uno de los túneles.

La campaña de campo consistió en perforaciones diamantinas, calicatas y estaciones geomecánicas. Asimismo se efectuó un intenso programa de ensayos de laboratorio.

En la caracterización se prestó una especial atención al estudio detallado de la fracturación ya que condiciona en gran medida el comportamiento de la excavación en riolitas y andesitas para las intensidades de fracturación presentes en el área de implantación de los túneles. Así en la Fig. 3 se muestra el estereograma con la densidad de polos obtenida de las mediciones efectuadas en la campaña de campo, donde se realizó un minucioso levantamiento obteniendo sus parámetros de continuidad, espaciado, apertura, rugosidad JRC, relleno, etc, y realizándose entre otros ensayos *tilt-test* y de esclerometría para estimar su JCS.

La caracterización geomecánica del macizo rocoso se realizó mediante el análisis de toda la información recabada y mediante el empleo de la metodología de *Hoek-Brown* para obtener los parámetros resistentes y deformacionales del macizo rocoso en función del **RMR**. En la **Tabla I** se especifican las propiedades asignadas a la unidad de Riolitas (KsTi-Ttr) y Andesitas Toquepala (KsTi-Tta).

c) Hidrogeología

No cabe esperar niveles de agua en los terrenos afectados por la excavación de los túneles. La presencia de agua no será importante y estará limitada a pequeñas zonas de humedad o goteo de agua por infiltración superficial directa.

d) Sismicidad y estado tensional

De acuerdo con la norma sismoresistente peruana, los túneles están situados en la zona 3 por lo que la aceleración sísmica a considerar es de 0,4g.

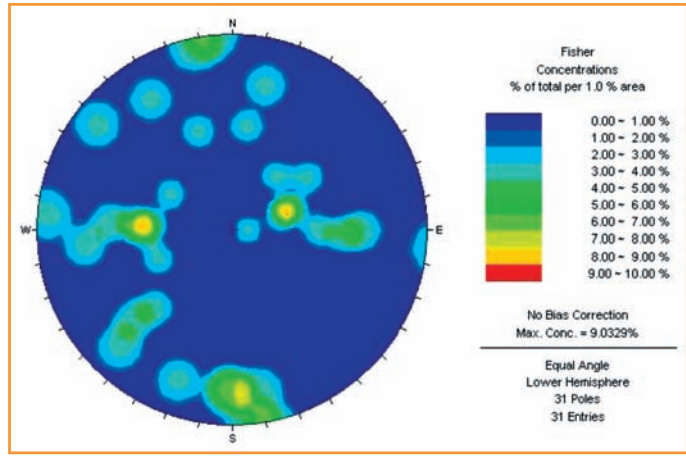
De acuerdo al contexto geotécnico y orográfico se consideró un estado tensional litostático con una distribución del coeficiente de esfuerzo **K0** de 1,5 en dirección Este-Oeste y de 2,0 en la dirección Norte-Sur.

Diseño de los túneles

En función de los requerimientos funcionales del túnel se establece la sección de excavación. A continuación, en base a la caracterización del terreno desarrollada se procede a la elección del método constructivo y al diseño de los sostenimientos.

a) Datos geométricos y funcionales

Los túneles, de longitudes de 2.063 y 154 m, poseen un ancho útil de 7,20 m destinado a

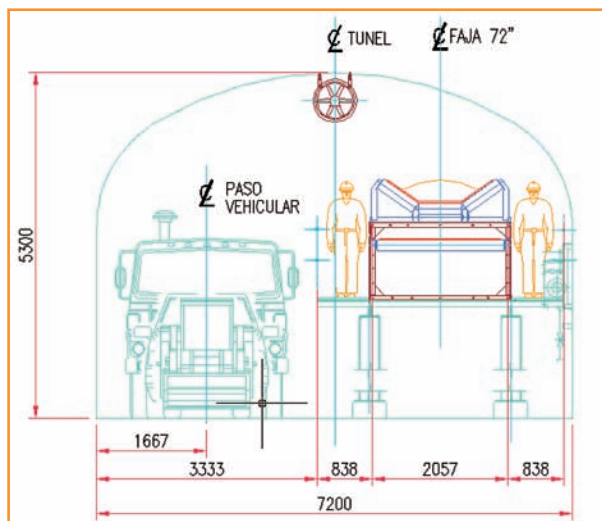


[Fig. 3].- Diagrama estereográfico de densidad de polos.

RMR _{cálculo}	E _m (MPa)	v	c (MPa)	φ (°)	γ (t/m ³)	h _{max} (m)
65	22.828	0,24	2.5	61	2,65	120
55	13.867		2.1	51	2,65	300
45	10.503		1.4	49	2,65	250
35	7.956		1.0	47	2,65	200
15	4.564		0.4	34	2,65	180

[TABLA III].- Principales parámetros geométricos y de explosivo de la voladura registrada.

Excavación



[Figura 4].- Sección geométrica de los túneles.

albergar una cinta transportadora y un carril de circulación de tráfico rodado. En la **Fig. 4** se muestra la sección funcional de los túneles que presenta solera plana, hastiales rectos y techo abovedado mediante la combinación de tres arcos circulares. La altura máxima es de 5,30 m y la sección de excavación tiene 35 m².

En el túnel largo se han ejecutado siete anchurones de 13,0 m de profundidad y 6,50 m de ancho útil con el objeto de albergar instalaciones eléctricas, y que a su vez se podrá emplear como espacio de estacionamiento o para permitir invertir el sentido de circulación del tráfico rodado. Adicionalmente estos espacios se emplearon en la fase constructiva como depósitos temporales de material y para facilitar la maniobrabilidad de los equipos.

b) Método constructivo. Sostenimientos

El método constructivo seleccionado fue el *NATM (Nuevo Método Austriaco)*. La excavación se llevó a cabo mediante explosivos en las zonas de terreno más resistentes, y mediante medios mecánicos en los terrenos de peor calidad geotécnica. En todos los casos, debido a las dimensiones de la sección (35 m²), la excavación se materializó a sección completa. El sostenimiento se ejecutó mediante elementos flexibles como son el hormigón proyectado, bulones y marcos metálicos que se adaptan perfectamente a la filosofía constructiva del *Nuevo Método Austriaco*.

Partiendo del modelo geotécnico de los macizos rocosos y a través de una metodología progresiva que emplea diversos criterios y procedimientos se definieron 5 diferentes tipos de sostenimiento. La **Tabla II** muestra los datos principales referentes a cada tipo de sostenimiento. La aplicación de estos sostenimientos tal y como se muestra en dicho cuadro depende de la calidad geomecánica del macizo rocoso cuantificada mediante el *RMR*.

El dimensionamiento de las secciones de

SECCIÓN TIPO	Sostenimiento propuesto				
	Sellado (Hormigón proyectado) e (cm)	Bulones Mn 12, L=3,0m e _r x e _l (m)	Hormigón proyectado de sostenimiento (cm)	Cerchas LG 70/26/18 e (m)	Otros (si es necesario)
ST-A	3	2,5x2,0	—	—	—
ST-B	3	2,0x2,0	4	—	—
ST-C	3	2,0x1,5	7	—	—
ST-D	3	—	12	1,5	—
ST-E	3	—	12+5	1,0	Empquetado Machón Sellado del frente

[Tabla II].- Secciones tipo de sostenimiento.

sostenimiento para las secciones tramicadas según el *RMR* se ha realizado considerando las recomendaciones de Barton así como la experiencia acumulada en obras y proyectos similares. Posteriormente se ha realizado la validación de estas secciones a través del método analítico de las curvas características, la comprobación de la estabilidad de bloques y cálculos tenso-deformacionales mediante diferencias finitas.

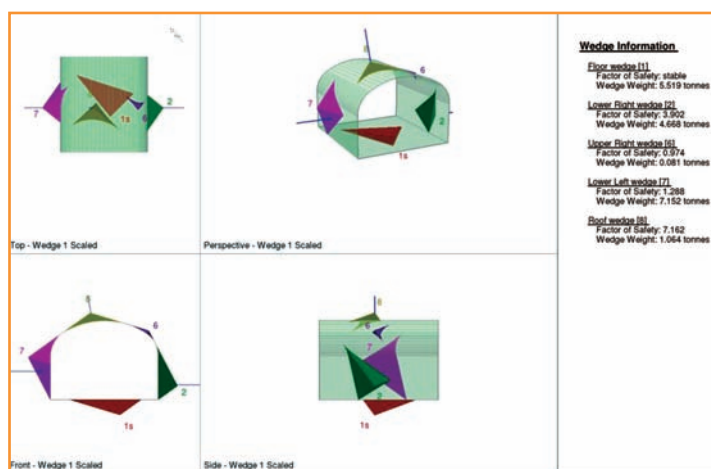
En las siguientes figuras se muestran algunas salidas gráficas obtenidas en el dimensionamiento de los sostenimientos. La **Fig. 5** muestra un análisis de estabilidad de caída de bloques realizado mediante el programa *UNWEDGE*, mientras que la **Fig. 6** muestra el

campo de deformaciones obtenido en un análisis con diferencias finitas mediante el programa *FLAC*.

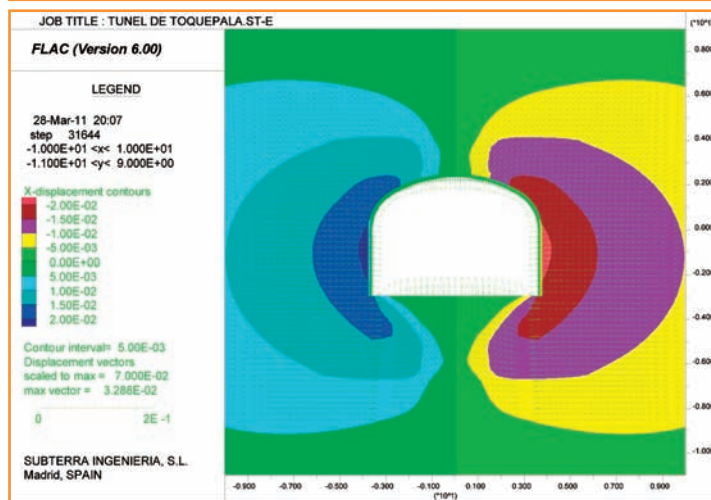
En todos los casos se emplearon bulones de expansión de 3,0 m de longitud y el hormigón proyectado empleado de resistencia 30 MPa fue reforzado mediante la adición de fibras de polipropileno en una dosificación de 3 kg/m³. Los marcos metálicos empleados fueron de tipo reticulado.

A modo ilustrativo, en las **Figs. 7 y 8** se muestran las secciones de sostenimiento tipo *C* y *E* que son, respectivamente, las más pesadas con bulones y marcos metálicos.

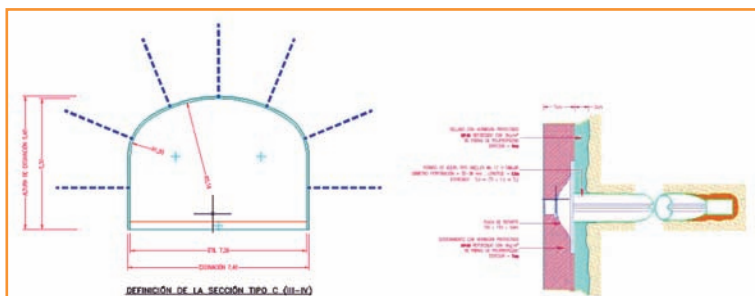
Adicionalmente, en algunas secciones de sostenimiento y en los emboquilles se implementó un refuerzo especial constituido por un



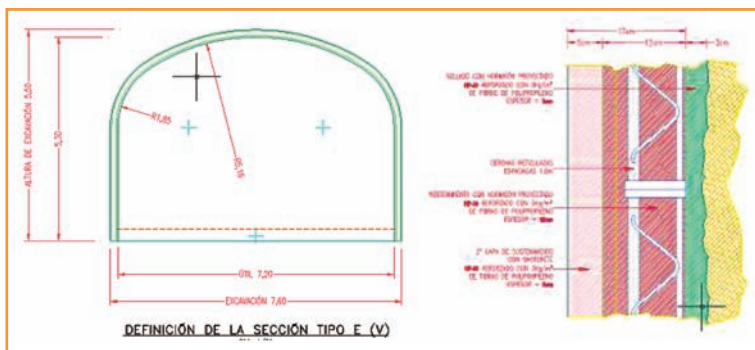
[Figura 5].- Análisis de caída de bloques mediante UNWEDGE.



[Figura 6].- Campo de deformaciones horizontales en ST-E obtenido mediante FLAC2D.



[Figura 7].- Sección tipo C de sostenimiento.



[Figura 8].- Sección tipo E de sostenimiento.

paraguas ligero de pernos Ø35 mm de 9 m de longitud.

Construcción de túneles

A continuación se describen los datos principales referentes a la construcción de los dos túneles.

La excavación del túnel largo se realizó empleando dos frentes asociados a cada uno de los portales de entrada y salida del mismo. Los trabajos comenzaron en septiembre de 2011 y finalizaron en marzo de 2012 con lo que se emplearon 7 meses para la excavación de los 2.063 metros de túnel con rendimientos de avance en el entorno de los 300 m/mes. La **Tabla III** muestra los avances medios alcanzados por cada frente de excavación.

a) Portales

Los cuatro portales se estudiaron especialmente con el objeto de optimizar su diseño. El sostenimiento de los taludes se ejecutó mediante bulones, drenes californianos y concreto proyectado para los taludes de tipo definitivo y únicamente mediante hormigón proyectado para los de carácter temporal.

Previamente al comienzo de los trabajos de excavación de los túneles se ejecutó un paraguas ligero mediante pernos de 9,0 metros de longitud con el objeto de reforzar los primeros

Portal	Sept-11	Oct-11	Nov-11	Dic-11	En-12	Feb-12	Mar-12
Entrada	-	12,1	62,7	157,3	152,6	220,8	219,8
Salida	80,2	241,59	186,6	173,1	183,41	188,3	184,9

[Tabla III] .- Avances mensuales obtenidos durante la excavación del túnel largo.



[Foto 1].- Portal de salida (lado Planta) del túnel de transporte principal.



[Foto 2].- Portal de entrada (lado Chancadora) del túnel de transporte principal.

metros de excavación. Asimismo se ejecutó una visera de protección de unos 3,0 metros de longitud.

Las **Fotos 1 y 2** muestran los emboquilles de entrada y salida del túnel principal.

b) Desarrollo constructivo

Durante la realización de ambos túneles se realizó un seguimiento geotécnico de los frentes de excavación efectuando el mapeo de los mismos para poder obtener el valor del **RMR** y los datos principales de las discontinuidades estructurales. El valor del **RMR** y la evolución de convergencias en el túnel han sido los dos criterios principales para la elección de las secciones tipo de sostenimiento a adoptar en cada fase de avance del frente. La distribución de las litologías y el espesor de las fallas detectadas en la fase de obra han cons-

tado un grado de ajuste muy elevado con el perfil geotécnico previsto en la fase de proyecto que se ha incluido en la **Fig. 2**. La **Tabla IV** incluye la comparación entre la previsión de la distribución de secciones tipo de sostenimiento y el que se aplicó en realidad en la excavación del túnel largo.

En las **Fotos 3, 4, 5 y 6** se muestran cuatro momentos de la construcción del túnel; y en las **Fotos 7 y 8** se puede apreciar la construcción de los sobre-anchos del túnel.

c) Monitoreo

El macizo rocoso fue instrumentado con el objeto de realizar un seguimiento de su comportamiento real. Este monitoreo consistió esen-

SECCIÓN SOSTENIM.	PROYECTADO		CONSTRUIDO	
	m	%	m	%
ST-A	252,6	12,4	292,4	14
ST-B	1519,45	74,6	1116,0	54
ST-C	155,55	7,6	564,0	27
ST-D	41,1	2,0	38,52	1,9
ST-E	66,9	3,2	52,29	2,6

[Tabla IV] .- Comparación entre las secciones de sostenimiento ejecutadas y proyectadas. Túnel largo.



■ [Fotos 7 y 8].- *Construcción de los sobreeanchos del túnel.*

■ [Fotos 3, 4, 5 y 6].- *Cuatro momentos de la construcción del túnel.*

cialmente en medidas de convergencia. El número total de estaciones de convergencia colocadas fue de 49 estaciones para el túnel largo y de 4 para el túnel corto. Se realizó un seguimiento sistemático de las convergencias, midiendo mediante cinta extensométrica. La densidad de las secciones se estableció en función de la calidad de los macizos a instrumentar. Respecto a la frecuencia de medición se estableció un criterio de mínimos a revisar en función de la velocidad de convergencia obtenida en las mediciones.

La totalidad de las secciones de convergencia mostraron un comportamiento dentro de lo previsible con una tendencia clara hacia la estabilización.

Conclusiones

Los trabajos de caracterización efectuados han permitido por una parte realizar diseños de los sostenimientos ajustados a las características del terreno en el que se han excavado los túneles de transporte de la *Mina Toquepala*, y por otro lado han posibilitado disponer de una

predicción bastante ajustada de la calidad del mismo.

Todo ello, junto con una maquinaria adecuada y un excelente plan de obra, han permitido alcanzar unos rendimientos de excavación realmente elevados en las máximas condiciones de seguridad para los operarios, sin que haya que reseñar ningún tipo de accidente.



SUBTERRA INGENIERÍA, S.L.

Vallehermoso, 30 - bajo
28015 Madrid

☎: 915 340 530

Web: www.subterra-ing.com

OSSA - OBRAS SUBTERRÁNEAS, S.A.

Aragoneses, 2-A - 3ª Plta • Pol. Ind.
28108 Alcobendas (Madrid)

☎: 902 678 808

Web: www.ossaint.com