



Túneles en Toquepala

Alcanzando nuevas profundidades

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 con 7.20 m de ancho funcional que permiten albergar una faja transportadora y un carril de circulación de tráfico rodado, para mejorar así el sistema del transporte del mineral.

Los túneles de 2.063 m y 154 m de longitud 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 (New Austrian Tunnel Method) (Nuevo método austriaco para túneles), 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 elementos coluviales, materializándose los afrontamientos de los túneles en andesitas y riolitas previa ejecución de paraguas de sostenimiento de 9 m de longitud. El sostenimiento de los taludes se ejecutó mediante bulones, drenes californianos y concreto proyectado para los taludes de tipo definitivo y únicamente mediante concreto proyectado para los de carácter temporal.



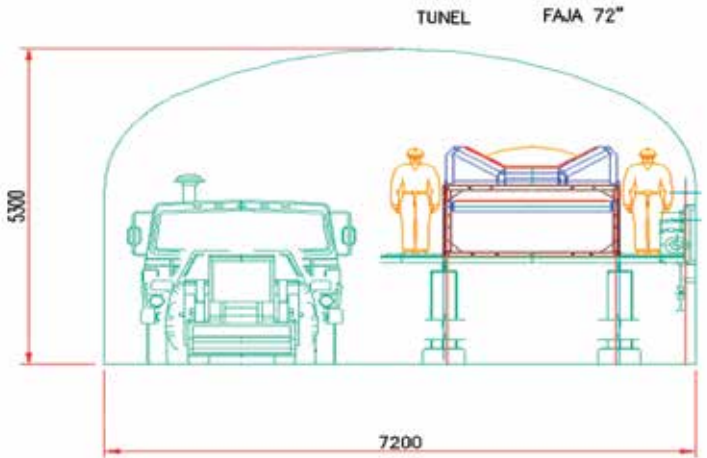
Los túneles han sido excavados mayoritariamente en riolitas y andesitas de buena calidad geotécnica, con un índice RMR normalmente superior a 50 puntos.



La excavación del túnel largo se ejecutó mediante dos frentes de avance y comenzó en septiembre de 2011. Estas obras finalizaron en marzo de 2012, con un promedio de avance de alrededor de 300 m/mes considerando los dos frentes. El túnel corto se realizó durante el mes de abril de este año.

[Diseño de túnel]

Datos geométricos y funcionales: En el túnel más largo se han ejecutado 7 anchurones de 13 m de profundidad y 6,50 m de ancho útil con el objetivo de albergar las instalaciones eléctricas, y que a su vez puede servir como espacio para estacionamiento o para permitir invertir el sentido de circulación del tráfico rodado.



Sección geométrica de los túneles .

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

La campaña de campo consistió en perforaciones diamantinas, calcatas y estaciones geomecánicas. Asimismo se efectuó un intenso programa de ensayos de laboratorio. La caracterización geomecánica del macizo rocoso se realizó mediante el análisis de toda la información recabada y considerando la geología de los túneles.

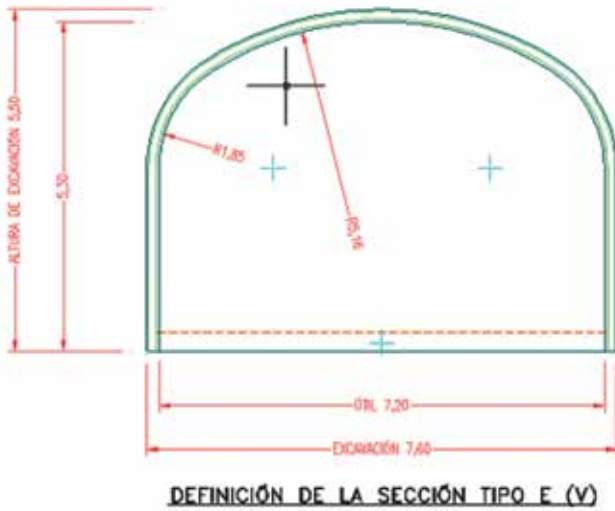
Método constructivo: El sistema seleccionado fue el NATM. La excavación se ejecutó mediante explosivos en las zonas de terreno más resistentes, y mediante medios mecánicos en los terrenos de

peor calidad geotécnica. En todos los casos, debido a las dimensiones de la sección (35 m²), su excavación se materializó a sección completa. El sostenimiento se ejecutó mediante elementos flexibles basados en el concreto proyectado (Shotcrete), bulones y marcos metálicos.

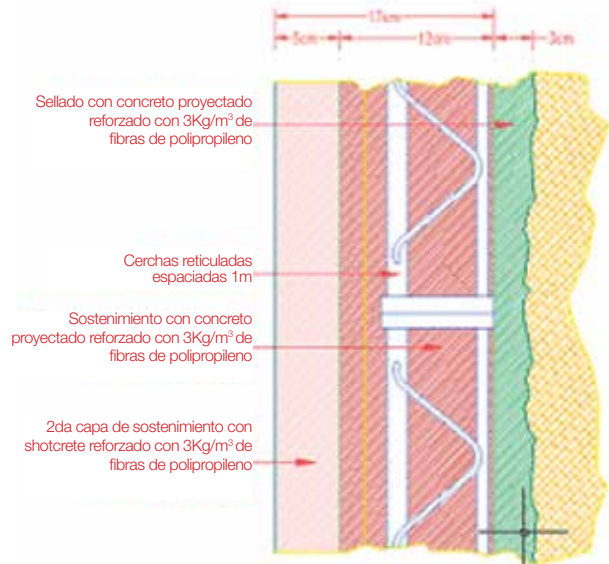
Partiendo del modelo geotécnico de los macizos rocosos y a través de una metodología progresiva que emplea diversos criterios y procedimientos se definieron 5 diferentes tipos de sostenimiento.

En todos los casos se emplearon bulones de expansión de 3 m de longitud y el concreto 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.

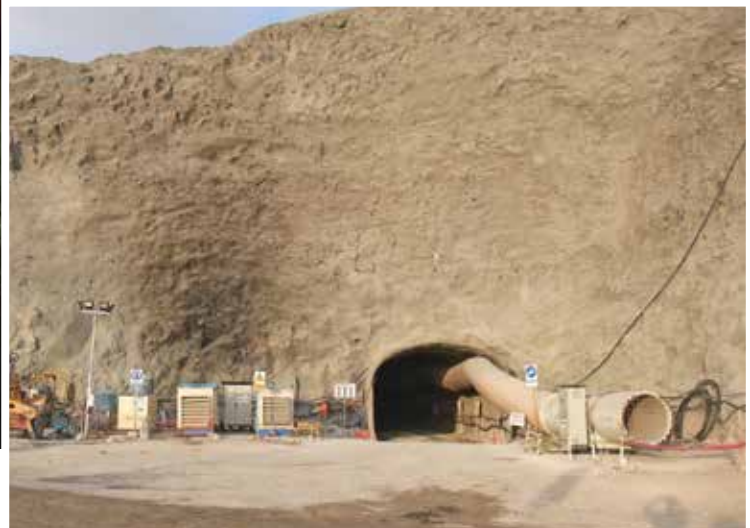
En algunas secciones de sostenimiento y en los emboquilles se implementó un refuerzo especial constituido por un paraguas ligero de pernos Ø35 mm de 9 m de longitud.



A modo ilustrativo en se puede apreciar el sostenimiento tipo E con bulones y marcos metálicos.



Vistas de la tubería de ventilación que aspira o impulsa los gases tóxicos producidos por los explosivos.





Previamente al comienzo de los trabajos de excavación se ejecutó un paraguas ligero mediante pernos de 9 m con el objeto de reforzar los primeros metros de excavación. Asimismo se implementó una visera de protección de 3 m.

[Construcción]

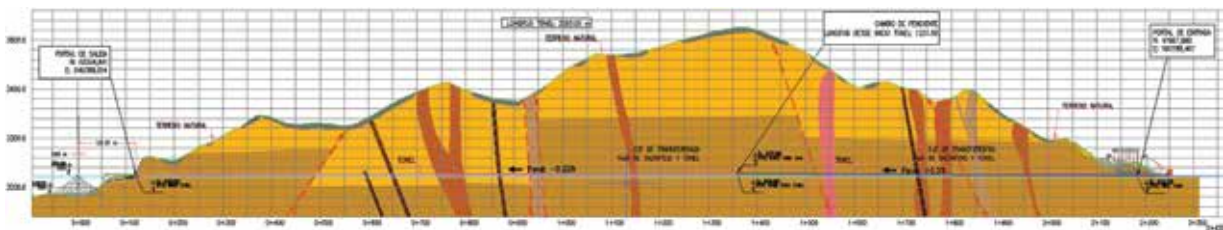
El túnel largo fue excavado empleando dos frentes asociados a cada uno de los portales de entrada y salida del mismo. La excavación del túnel corto se realizó durante el mes de abril y mediante un único frente de excavación.

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 shotcrete 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 m de longitud con el objeto de reforzar los primeros metros de excavación. Asimismo se implementó una visera de protección de 3m de longitud.

Durante la realización de ambos túneles se hizo 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.

El macizo rocoso fue instrumentado con el objeto de realizar un seguimiento de su comportamiento real. Éste consistió esencialmente 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 con cinta extensométrica. La densidad de las secciones se estableció en función de la calidad de los macizos a instrumentar.



Perfil longitudinal geológico del túnel largo

Datos geológicos

El yacimiento minero de Toquepala se encuentra ubicado en el sur del Perú, en el departamento de Tacna, y se trata de una región de topografía accidentada, debido a innumerables quebradas profundas que en su recorrido, desde la sierra hacia los desiertos de la costa, cortan transversalmente el flanco occidental de los andes sur-occidentales.

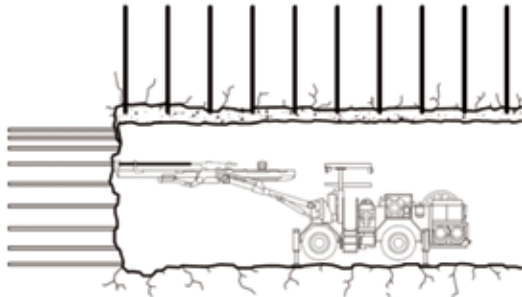
Los macizos rocosos encontrados dentro del área de estudio están conformados por rocas ígneas de origen volcánico (riolitas y andesitas), e intrusivo (brechas de turmalina, diques y porfidos) que se encuentran cubiertas de manera parcial o total por depósitos cuaternarios tales como coluviales, aluviales y residuales.

Adicionalmente el macizo rocoso está afectado por varios sistemas de familias de juntas y fallas habiéndose diferenciado para su estudio 7 dominios estructurales. Se han realizado análisis estadísticos para todas las familias de juntas con el fin de determinar la dispersión de discontinuidades en términos de persistencia, rugosidad, apertura y espaciado.

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. El campo de esfuerzos natural adoptado corresponde a una distribución del coeficiente de esfuerzo K_0 de 1,5 en dirección Este-Oeste y de 2,0 en la dirección Norte-Sur. Finalmente la presencia de agua no será importante y será limitada a pequeñas zonas de humedad o goteo.

Pasos de la excavación

Siguiendo el plan de tiro establecido en el proyecto, el topógrafo sitúa el contorno de los puntos a barrenar y la posición de los barrenos más importantes como son los de contorno, los de cuele y los de contracuele. Para el caso de jumbos robotizados se procede a introducir la posición de los barrenos en el ordenador a bordo de la máquina. Con un jumbo se perforan los barrenos en el frente del túnel siguiendo las pautas marcadas por el topógrafo. Los barrenos de contorno o de perfil deberán ser rigurosamente paralelos y equidistantes.



Perforación de barrenos

Los barrenos se rellenan con los cartuchos de explosivo. Estos deben llegar al fondo del barreno para lo cual se usa media caña a fin de introducirlos hasta el final, o se facilita su inserción con ayuda de una barra de madera o plástico auxiliar. Una

vez colocados todos los explosivos se conecta entre ellos un cordón detonante. Los detonadores pueden provocar distintos retardos en la explosión consiguiendo así la correcta secuencia de disparo.

Después de la detonación hay una gran presencia de polvo, debido a la roca, y de gases tóxicos producidos por los explosivos, por lo que es preciso ventilar y esperar a que esta presencia de gases y polvo disminuya para poder acceder al túnel. La ventilación se hace mediante la tubería de ventilación aspirando o impulsando los gases tóxicos.

Una vez que la presencia de polvo y gases es tal, que no hace peligroso el ingreso al túnel, se procede a la retirada del material excavado mediante palas cargadoras y camiones bañera.



Carga, saneo y desescombro



Panel con plan de otro para barrenos.



Instalación de cartuchos y explosivos dentro de los barrenos.

Experiencia en túneles

La construcción de los túneles estuvo a cargo de la empresa Obras Subterráneas SA, firma española especialista en diseño y ejecución de obras subterráneas. Al respecto conversamos con su country manager en Perú, Adolfo Sicilia, quien indicó que los túneles fueron realizados para una mejora tecnológica de la mina. “En este proyecto nos encargamos de la ingeniería, procura y construcción. Además aplicamos innovadoras soluciones para un mejor avance, seguridad y buena ejecución de la obra”, dijo no sin antes comentar que el desarrollo de toda la ingeniería la hicieron mediante elementos finitos con cálculos en tres dimensiones.

Así también, comentó que “para los trabajos de reforzamiento aplicamos shotcrete vía húmeda con fibras de polipropileno, lo que es novedoso en el país pues acá aún se suele usar mallas de acero para este tipo de labores. En otros países hace más de 20 años se dejó de emplear dichas mallas para dar paso al sistema shotcrete con fibras de acero”, aseguró.

Al respecto se debe precisar que la nueva tecnología en base a fibras de polipropileno ha sido desarrollada para reforzar y extender la durabilidad del concreto proyectado para el soporte de rocas, otorgando tenacidad y ductilidad.

De otro lado, la empresa Obras Subterráneas SA, también realizó un detallado informe geológico que le brindó muy buenos resultados. “El informe nos permitió intuir con lo que nos íbamos a encontrar dentro del túnel. Así descubrimos, con errores de solo medio metro, en qué lugares se encontraban las fallas, lo que nos facilitó el avance rápido y seguro del túnel”, precisó, para luego agregar que estudios de ese tipo son indispensables a la hora de realizar túneles largos, pues no hay forma de saber qué hay en el interior, y conforme se va excavando uno puede encontrar sorpresas muy desagradables en el camino como agua o terreno blando, lo que se convierte en problemas y por supuesto mayores gastos de inversión.

Finalmente recaló que como sistema de avance se empleó el drilling and blast, nuevo método austriaco que incluye perforación, voladura y extracción del material. “Esto nos permitió tener un rendimiento diario de 14 metros, llegando a veces a los 16 metros. Y para el reforzamiento hemos usado un perno expansivo tipo Swellex, los cuales se abren al imprimirles presión, logrando así que se adhieran de mejor forma al macizo rocoso”, explicó.

Datos de la obra

62,000 m³ de excavación de túnel
 250,000 m³ de excavación de portales
 7,000 m de pernos helicoidales de diámetro 1" L=10'
 470 cerchas HEB 160.30 cm de espesor de gunita.

Principales materiales

Concreto proyectado	M ²	34,152
Fibras de polipropileno	kg	18,750
Cerchas metálicas tipo celosía	Ud	150
Explosivos	kg	425,000



El sostenimiento se ejecutó mediante shotcrete con fibras de polipropileno, bulones y marcos metálicos

“CON EL INFORME GEOLÓGICO DESCUBRIMOS, CON ERRORES DE SOLO MEDIO METRO. EN QUÉ LUGARES SE ENCONTRABAN LAS FALLAS”.