

Los Túneles Pucará y Transandino del proyecto de trasvase Majes – Sigwas II, Arequipa, Perú

El Proyecto Majes-Sigwas es un proyecto basado en la regulación y derivación de recursos hídricos de las cuencas altas de los ríos Colca y Apurímac (vertiente Atlántica) para su uso racional en la irrigación de hasta 60,500 hectáreas de tierras nuevas para el cultivo en las Pampas de Majes y Sigwas (Departamento de Arequipa) que pertenecen a la vertiente Pacífica. Así mismo, en el futuro, se prevé el aprovechamiento hidroeléctrico.

Palabras clave: CAPTACIÓN, HÍDRICO, IRRIGACIÓN, PRESA, REGULACIÓN, REVESTIMIENTO, SECCIÓN, SOSTENIMIENTO, TRASVASE, TÚNEL.

ALVAREZ, E; BOISÁN, M⁺; CABO, M (*) CHAVES, E (**); M; POZO, V (*)
SUBTERRA Perú, S.A.C.; (*) SUBTERRA Ingeniería S.L.
 (**) SUBTERRA Ingeniería Ltda

En septiembre de 2010, AUTODEMA (Autoridad Autónoma de de Majes) organismo del Gobierno Regional de Arequipa, adjudicó al Consorcio *Angostura-Sigwas*, conformado por COBRA y COSAPI, el *Contrato de Concesión para la construcción, operación y mantenimiento de las obras mayores de afianzamiento hídrico y de infraestructura para irrigación de las Pampas de Sigwas – Proyecto Especial Majes Sigwas Etapa II*.

La zona del proyecto se encuentra ubicada políticamente en el Departamento de Arequipa y se compone de dos zonas geográficas claramente definidas denominadas **Fase 1** y **Fase 2**.

Fase 1.

La Fase 1 es la zona alta (aproximadamente sobre 4500 msnm) ubicada en plena Cordillera Andina en las Provincias de Caylloma y Arequipa, específicamente en los distritos de Tisco y Caylloma.

Esta etapa comprende la construcción de la presa de *Angostura* y del túnel de conducción *Pucará – Transandino*. Estas obras subterráneas de la conducción son las que se describen específicamente en el presente artículo.

Fase 2.

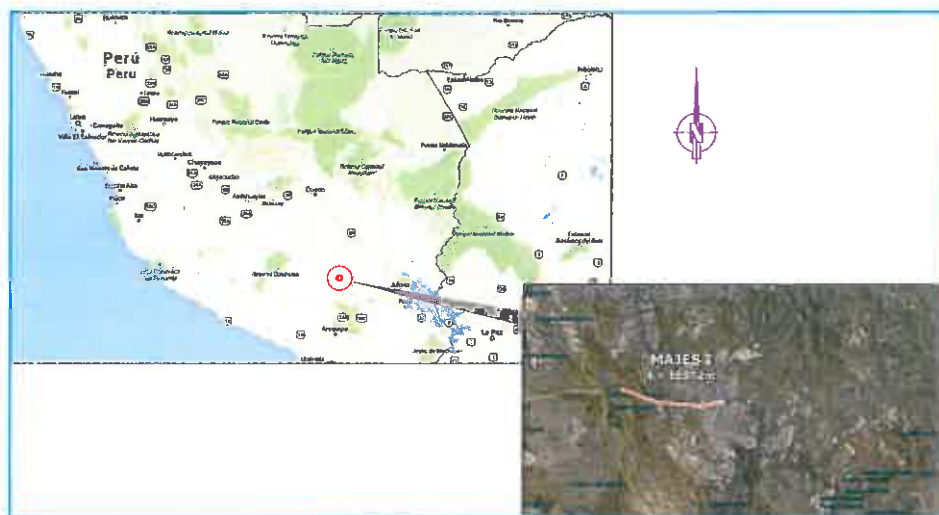
La Fase 2 (entre los 1800 y 1200 msnm) se ubica en los distritos de San Juan de Sigwas, Santa Isabel de Sigwas y Santa Rita de Sigwas y cuenta con las siguientes obras mayores.

- Sistema de captación en Lluclla: bocatomas y desarenador.
- Derivación Lluclla-Sigwas (compuesto por un sistema de conducción con tramos de túneles y canales).
- Canal Madre.

En la **Fig. 1** se muestra la ubicación del proyecto Majes – Sigwas.

Antecedentes

El proyecto de irrigación *Majes – Sigwas* ha sido objeto de estudio desde el año 1966, fecha en la que se desarrolló el "Estudio de Factibilidad de la Irrigación de las Pampas de Ma-



[Fig. 1].- Situación del proyecto Majes - Sigwas

jes, Sigwas y La Joya, por parte de ELC *Electroconsult* para el Ministerio de Fomento y Obras Públicas.

En estos estudios iniciales el proyecto quedó dividido en de dos etapas: *Primera Etapa* y *Segunda Etapa*.

La *Primera Etapa*, ya construida y en operación desde el 3 de octubre de 1971, fue ejecutada mediante inversión pública y se ha materializado mediante la construcción de las siguientes obras:

- *Represa de Condorama* (285 Hm³).
- *Bocatoma de Tuti* (Capacidad de descarga 34 m³/s).
- *Aducción Colca-Sigwas* (88 km de túneles, 13 km de canales).
- *Bocatoma de Pitay*.
- *Derivación Sigwas* hacia Pampa de Majes (15 km y Q= 20 m³/s).
- Red de Distribución e Infraestructura de Riego (14 mil Ha, ampliables a 22 mil Ha).
- Carreteras y servicios.

El desarrollo de la *Segunda Etapa* del proyecto, la que nos ocupa, ha sido planteada mediante la promoción de la inversión privada, siendo el *Consorcio Angostura Sigwas* el

adjudicatario de la concesión, prevé maximizar y optimizar el uso de la infraestructura hidráulica mayor existente y su complementación con las siguientes obras:

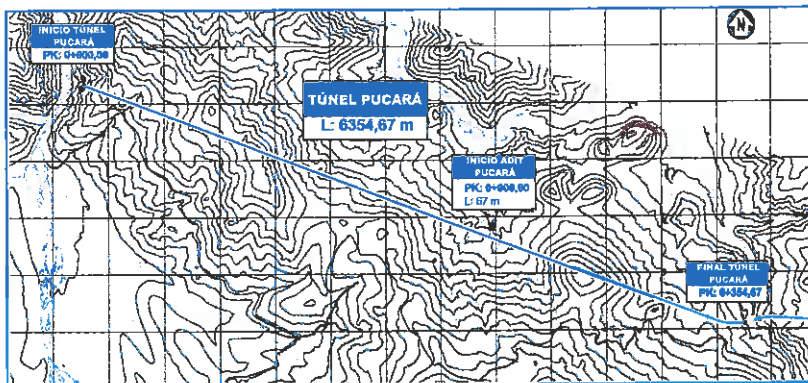
- *Presa de Angostura* (1140 Hm³).
- *Derivación Angostura-Colca* (16.5 km y Q = 30 m³/s) con el que se pretende irrigar las pampas de Majes con agua del río Apurímac situado en la vertiente atlántica.
- *Derivación Sigwas* hacia Pampas de Sigwas
- Red de Distribución e Infraestructura de Riego para habilitar y desarrollar 38.500 Ha de tierras nuevas en las Pampas de Sigwas y 7.000 Ha en las Pampas de Majes.
- Componente Hidroeléctrico (513 MW).
- Carreteras y Servicios.

Las obras correspondientes a la Segunda etapa del proyecto fueron inauguradas el pasado 6 de febrero de 2014 por el Presidente de la República Ollanta Humala que procedió a colocar la primera piedra de la obra.

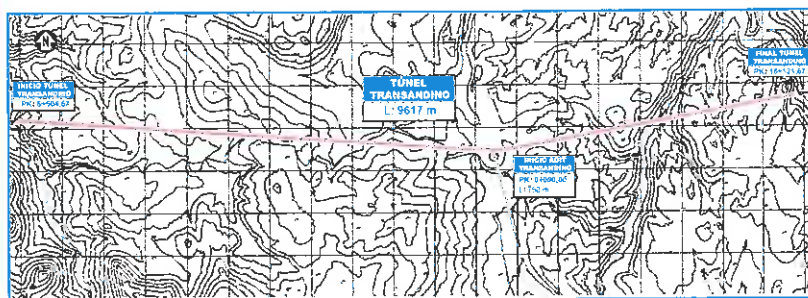
En la **Fig. 2** se muestra sobre una imagen de *MDA EarthSat Google Earth*, los detalles de la Segunda Etapa de *Majes – Sigwas*, desta-



■ [Fig. 2].- Segunda etapa del proyecto Majes - Siguas.



■ [Fig. 3].- Trazado en planta del túnel Pucará.



■ [Fig. 4].- Trazado en planta del túnel Transandino.

cándose en color rojo las obras de la fase 1 y de la fase 2. En color amarillo está señalada la aducción Colca -Siguas existente.

Respecto a esta Segunda Etapa, durante los años 1998 y 1999 el Consorcio HARZA - MISTT desarrolló los estudios del Proyecto de la Presa Angostura y de la derivación de Angostura.

Posteriormente, en el año 2007 la consultora Lahmeyer Agua y Energía realizó un informe para la concesión de las obras para la irrigación de las Pampas del Siguas.

Con estos antecedentes es con los que se ha partido para el desarrollo de la ingeniería de detalle dentro del Contrato de Concesión para la construcción, operación y mantenimiento de las obras mayores de affianzamiento hídrico y de infraestructura para irrigación de las Pampas de Siguas - Proyecto Especial Majes Siguas Etapa II.

Descripción de los Túneles Pucará y Transandino

Dentro de las obras recogidas en la Fase 1 de la Segunda Etapa del Proyecto Majes Siguas, se ha previsto la construcción de un túnel de conducción que se subdivide en un primer túnel, Túnel Pucará de 6,354 m (Fig. 3), y en un segundo túnel, Túnel Transandino de 9,617 m (Fig. 4). Ambos túneles presentan una pendiente descendente constante de 0.66%. Entre los dos túneles se encuentra la quebrada de Andamayo, donde se construirá un acueducto.

El trazado propuesto para la conducción facilita la construcción de sendos adits, uno para cada uno de los túneles, para la ejecución de

los trabajos mediante 8 frentes de excavación. La longitud de estos adits resulta de 67 m en el túnel Pucará y de 750 m para el túnel Transandino.

El trazado definido, presenta las siguientes optimizaciones respecto al definido en etapas anteriores:

- Disminuye la longitud del túnel.
- Posibilita la creación de sendos adits o ventanas intermedias tanto en el túnel Pucará como en el Transandino.
- Optimiza el cruce del río Andamayo.
- Evita puntos geotécnicos críticos, tales como cruces bajo el río Chahuanca.

También se ha analizado la ejecución de estos túneles mediante máquina tuneladora, en cuyo caso, no sería necesaria la construcción de los adits y en el caso específico del túnel transandino se ha rectificado el trazado en planta, a una única alineación, disminuyendo la longitud del túnel. El diseño de esta solución constructiva se ha desarrollado a nivel de Proyecto Básico, dejando abierta la licitación a los futuros contratistas para que opten por el método constructivo.

En las Fotos 1 a 8 se muestra un reportaje fotográfico de los túneles Pucará y Transandino.

Geología y Geotecnia

La zona de estudio se encuentra entre la quebrada Angostura, sobre el río Apurímac, y el Río Chahuanca, afluente del río Colca, a una altura sobre el nivel del mar entre los 4.200 y 4.500 msnm y con una topografía rocosa..



■ [Foto 1].- Inicio del túnel de Pucará en la cerrada Angostura sobre el río Apurímac.



■ [Foto 2].- Túnel de Pucará entre la toma y el adit.

a) Estratigrafía

La geología del área de estudio se inicia en el Jurásico Medio, con la unidad más antigua que corresponde al grupo Yura, que aflora unos 15 km al S del área de estudio, por lo que las unidades terciarias presentes en el tú-

Túneles



[Foto 3].- Ubicación del adit proyectado para el túnel Pucará.



[Foto 4].- Portales de salida del túnel Pucará y entrada del túnel Transandino respectivamente (Ventana de Andamayo).



[Foto 5].- Perforación diamantina S-4 ubicada en la ventana de Andamayo.



[Foto 6].- Terreno bajo el que discurre el túnel Transandino.



[Foto 7].- Portal de salida del túnel Transandino.



[Foto 8].- Vista del futuro talud frontal del portal de salida del túnel Transandino.

nel sobreyacen en discordancia angular a los materiales del Mesozoico.

El Terciario es vulcano-clástico y está representado por el Grupo Tacaza. Dentro de este grupo se diferencian las formaciones Orco-pampa e Ichocollo:

- Formación Orcopampa: formada por lavas andesíticas intercaladas con tobas.
- Formación Ichocollo: compuesta por lavas andesíticas y brechas traquibasálticas

Sobreyaciendo en discordancia angular sobre el Grupo Tacaza, están las tobas de la formación Sencca, del Plioceno, formada por un conjunto de facies tobáceas esencialmente dacíticas y riolíticas

Finalmente, sobre las unidades citadas se depositan los materiales cuaternarios. En la zona de estudio se encuentran los depósitos de tipo aluvial asociados a los ríos Apurímac, Andamayo, Huaruma y Challhuanca, así como depósitos de bofedales que se ubican principalmente en zonas de meseta.

b) Tectónica, tensiones naturales y sismicidad

La zona de estudio está afectada por varios eventos tectónicos pertenecientes al Ciclo Andino:

1) Fase Peruana e Incaica: consiste en un levantamiento general con pliegues y fallas con rumbo NW-SE al principio y ya en la fase Incaica se produce una ligera rotación de los ejes E-W al final de la fase; así como fallas contemporáneas. Esta fase afectó a los materiales del Grupo Yura.

2) Fase Quechua: que afectó a las volcánicas del Grupo Tacaza y consta de dos etapas, ambas compresionales, siendo la primera de plegamiento y la segunda de fracturación y fallamiento. La primera etapa ocasionó pliegues amplios y simétricos de rumbo NW-SE con buzamiento de 10-20°. La segunda etapa dio origen a fallas de desgarre conjugadas con direcciones NW-SE y NE-SW, las primeras son sinestrales y las segundas dextrales, lo que da una compresión E-O y también dio origen a fracturas de tensión debidas a la compresión.

3) Fase Pliocénica: que afectó a las volcánicas de la formación Sencca, determinó los centros volcánicos por donde fluyeron dichas volcánicas, que se encuentran subhorizontales con los conductos volcánicos alineados.

La tectónica general de la zona del trazado está controlada por dos sistemas principales de fallamiento, la falla Chila de dirección promedio de N50°W/75°SW, en el límite Norte y la falla Pusa de dirección N65°W/70°N que delimita el borde Sur. Adicionalmente a estas estructuras se observa una orientación preferencial de estructuras de menor entidad según la dirección NW-SE.

El análisis tectónico ha permitido establecer las tensiones naturales más plausibles en am-

bos túneles considerándose los siguientes valores para el coeficiente de reparto de tensiones:

$$K_{0x} = 0.9; \quad K_{0z} = 1.4$$

Según la zonificación sísmica del territorio nacional de Perú (Fig. 5), el área de estudio está en cuadrada en la zona 3, por lo que correspondería a un factor Z igual a 0.4 g.



[Fig. 5].- Mapa de zonificación sísmica de Perú

c) Hidrogeología

A partir de los datos obtenidos de las estaciones geomecánicas, y de los ensayos de per-

meabilidad realizados en las perforaciones diamantinas, se deduce que la roca presente en el trazado se caracteriza por ser una roca poco permeable, con valores de permeabilidad entre 10^{-5} y 10^{-6} m/s; y sin circulación de agua. Únicamente, las tobas correspondientes a la *Formación Sencca* pudieran generar problemas de aporte de agua en la excavación del túnel, al haberse detectado rezumes en algunos de los afloramientos.

Mención especial requieren los depósitos bofedales por su capacidad de absorción de agua, hasta la saturación, los cuales retienen agua durante la temporada lluviosa y actúan como trampas naturales para la retención de sedimentos; aportan agua a los acuíferos; y surten agua a riachos y manantiales.

d) Geotecnia

Para la elaboración del proyecto se ha dispuesto de los siguientes trabajos de investigación sobre un mapeo geológico-geotécnico a escala 1:1.000:

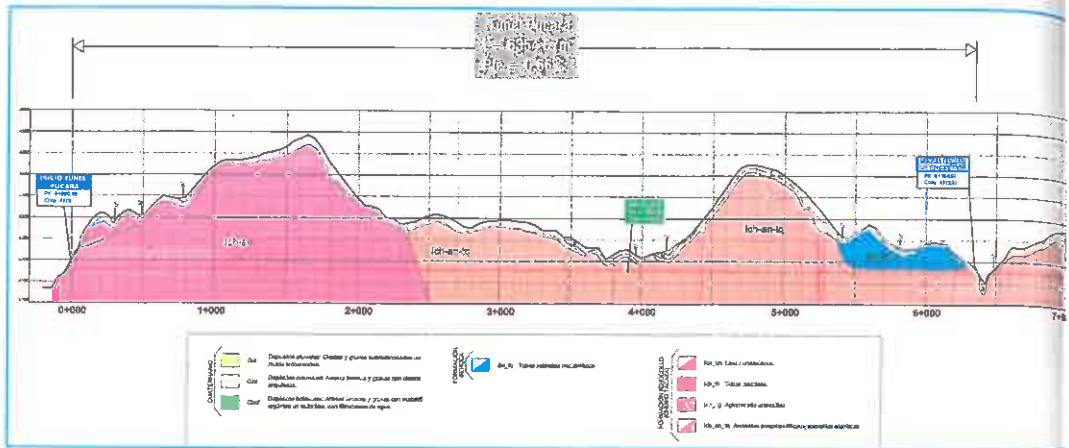
- 103 estaciones geomecánicas y 8 calicatas.
- 2.365,2 metros de perforación distribuidas en 28 perforaciones.
- 24 perfiles de sísmica de refracción (1.320 ml).
- 7 perfiles ERT de tomografía eléctrica (6.355 m para el *Túnel Pucará* y 9.615 m para el *túnel Transandino*).
- 405 m medidas de Potencial Espontáneo (SP).
- 94 SEV (Sondeo Eléctrico Vertical).
- 112 ensayos de permeabilidad *Lugeon*.
- 5 ensayos presio-dilatométricos.

Así como de numerosos ensayos de laboratorio sobre muestras obtenidas en los sondeos perforados.

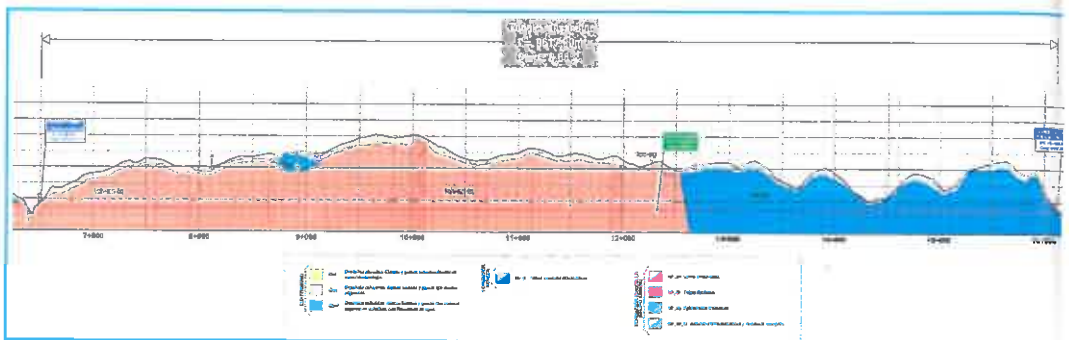
Estos trabajos de investigación han permitido disponer de un excelente conocimiento de los materiales en los que se excavarán ambos túneles. Así en las **Figs. 6 y 7** se muestran sendos perfiles geológicos sintéticos de los dos túneles.

Desde el punto de vista puramente geomecánico los distintos materiales han sido objeto de una minuciosa caracterización basada en el análisis de la calidad geomecánica del macizo rocoso y de los ensayos in situ y de laboratorio disponibles. En este sentido, y a modo de ejemplo en la **Fig. 8** se muestra un histograma de frecuencias de la calidad de las andesitas de la *formación Ichocollo*.

Todos estos trabajos han permitido definir las propiedades geomecánicas de los materiales



■ [Fig. 6].- Perfil geológico del Túnel Pucará

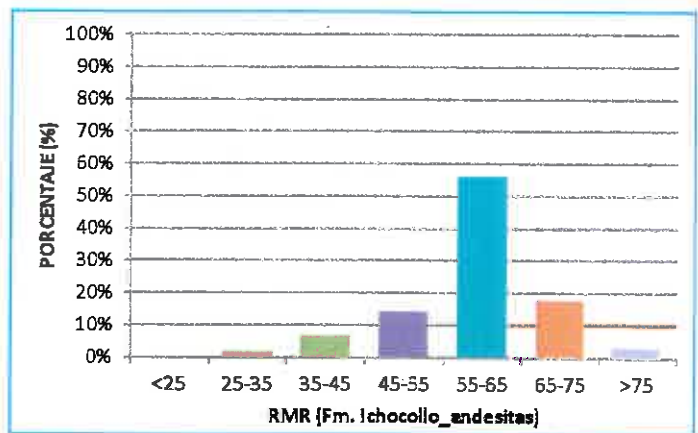


■ [Fig. 7].- Perfil geológico del Túnel Transandino.

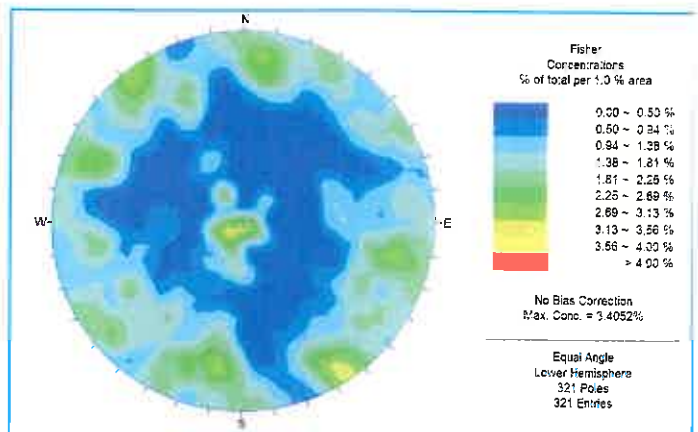
del *Grupo Tacaza y Sencca*.

Además de caracterizar el macizo rocoso y dado su buena calidad general, se ha prestado una especial atención a la caracterización de las discontinuidades estructurales, estableciendo las familias de juntas existentes en cada unidad y sus parámetros de resistencia al corte. A modo de ejemplo en la **Fig. 9** se muestra el estereograma con la distribución estadística de los 321 polos de discontinuidades medidos para los materiales de la *formación Sencca* y que han servido para establecer en cada caso, las familias de juntas existentes con las que calcular los problemas de cuñas y bloques de roca en los túneles.

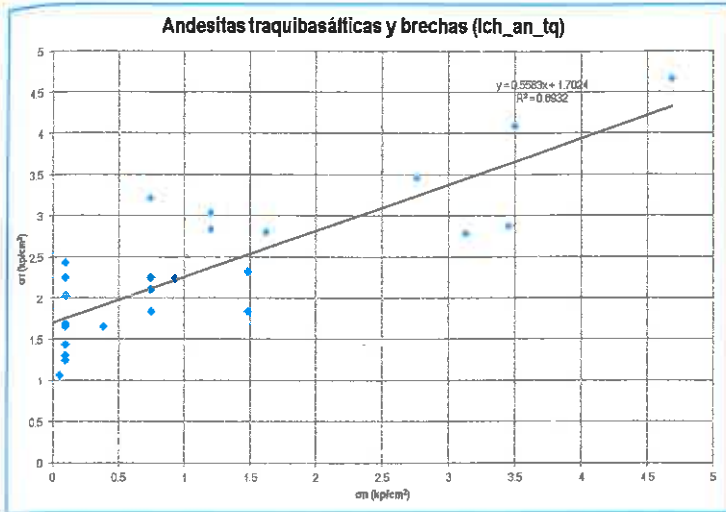
De igual forma, como ejemplo, en la **Fig. 10** se muestra la estimación realizada para determinar los parámetros de corte de pico de las andesitas de la *formación Ichocollo*.



■ [Fig. 8].- Distribución estadística del RMR en las andesitas de la Fm. Ichocollo



■ [Fig. 9].- Estereograma de fracturación de la formación Sencca.



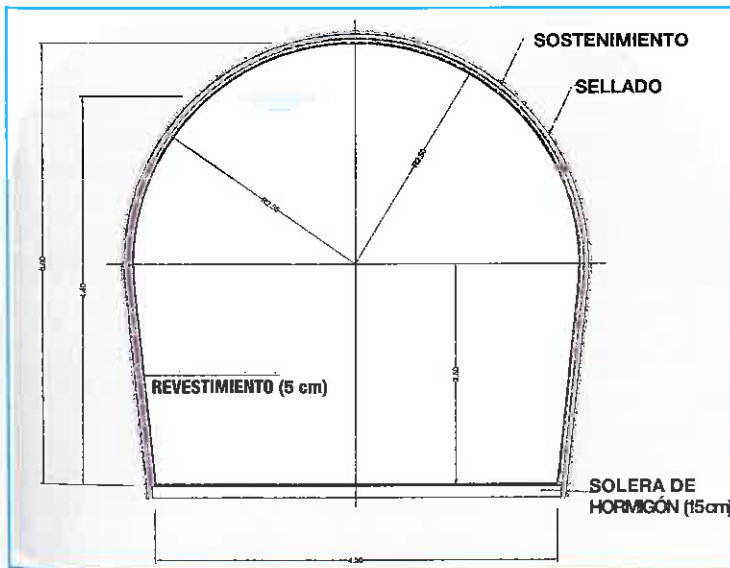
[Fig. 10].- Parámetros resistentes de discontinuidades en andesitas traquibasálticas.

Sección funcional

La sección funcional de los túneles *Pucará* y *Transandino* viene marcada por dos condicionantes principales:

- El condicionante hidráulico que arroja una sección mínima necesaria para la correcta circulación del caudal máximo de diseño.
- El condicionante constructivo, proveniente del método constructivo a emplear.

El diseño hidráulico para la sección tipo herradura empleando un revestimiento a base de concreto lanzado arroja un ancho útil de 4,50 m y una altura de 5,0 m considerando un 80% de llenado, tal y como se muestra en la Fig. 11.



[Fig. 11].- Dimensiones interiores de la sección

Estas dimensiones permiten el tránsito de la maquinaria habitual en la ejecución de túneles así como la colocación de las instalaciones de ventilación durante la construcción de la obra.

Método constructivo y diseño de soportes

El diseño de los túneles *Pucará* y *Transandino* se ha realizado a nivel constructivo para el caso de la ejecución con métodos convencionales y a nivel de Proyecto Básico para su construcción empleando una TBM.

La obra será licitada dando libertad al contratista para que oferte ambos métodos constructivos.

Construcción mediante Métodos Convencionales (D&B)

Dada la sección de los túneles, éstos se excavarán a sección completa basándose su proceso constructivo en el *Nuevo Método Austriaco*.

La excavación se realizará mediante el método de perforación y voladura. En las zonas donde el terreno muestre peores características será necesario el uso de medios mecánicos como martillos hidráulicos.

Para el diseño de los soportes para la excavación mediante el *Nuevo Método Austriaco*, se ha seguido una metodología progresiva, que aplica sucesivamente diferentes criterios y procedimientos, en el siguiente orden:

- **Clasificaciones geomecánicas:** métodos empíricos basados en la experiencia en otros túneles, que dan un prediseño muy ajustado del sostenimiento a instalar. Así

mismo ha resultado muy indicado la experiencia de *Subterra* en túneles andinos

(Galera et al, 2011; Paul et al, 2012 y Chávez et al 2013).

- **Métodos analíticos:** el método analítico de las curvas características, también denominado convergencia-confinamiento, Panet (1985).
- **Métodos numéricos:** una vez predefinidos los sostenimientos con los criterios basados en las clasificaciones geomecánicas, se aplican métodos basados en el análisis de simulaciones numéricas utilizando códigos de elementos de contorno.

Adicionalmente los soportes han sido comprobados de acuerdo a las discontinuidades medidas, realizando *cálculo de cuñas y bloques de roca*, basados en la teoría de bloques, que determina dónde pueden existir bloques peligrosos en un macizo rocoso interceptado por diferentes discontinuidades. Los bloques se forman por la intersección de juntas y fracturas en el macizo rocoso.

En base a lo anterior, se han definido y justificado los soportes que se incluyen en la *Tabla I*.

Construcción mediante TBM

Como se ha mencionado, se ha analizado y definido la ejecución del túnel mediante máquina tuneladora ya que la longitud de los túneles parece hacer atractiva esta solución.

Este proceso constructivo implica la modificación del trazado, el cual se muestra en la Fig. 12, ya que al no ser necesarios los adits de ataque intermedio, éste no estará condicionado por ellos y será ligeramente más corto (6,360 m el túnel *Pucará* y 9.555 m el túnel *Transandino*).

Así mismo, el proceso constructivo también condicionará la sección funcional que además estará condicionada por el revestimiento ya que éste modifica el coeficiente de rugosidad y por consiguiente el funcionamiento hidráulico.

Para la selección de la TBM más indicada así como para la estimación de los posibles rendimientos a obtener mediante el empleo de TBMs, se ha usado el sistema *RME* (Bieniawski, et al 2008).

Este análisis hace recomendable el uso de un topo para el túnel *Pucará* y un Doble Escudo para el túnel *Transandino* (Figs 13 y 14).

Los sostenimientos para el túnel *Pucará*, a base de shotcrete, pernos y marcos, serán similares a los definidos para los métodos convencionales.

El sostenimiento del túnel *Transandino* será a base de dovelas prefabricadas de concreto, cuyo espesor se ha predefinido en 25 cm.

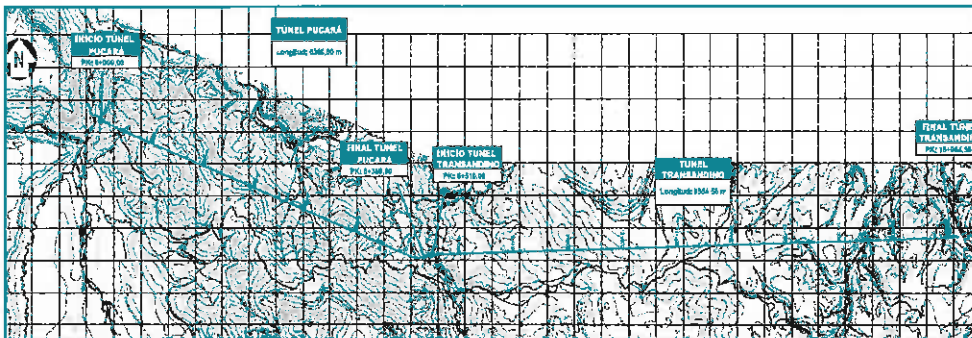
Revestimientos y acabados

El túnel de conducción durante su explotación trabajará a pelo libre, por lo que se ha definido un revestimiento a base de 5 cm de shotcrete

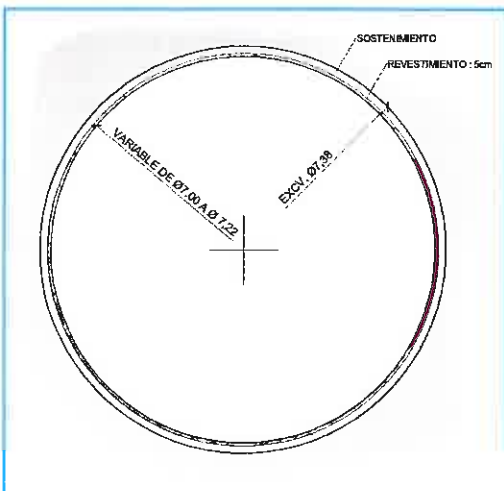
SOST. TIPO	RMR	LONGITUD PASE (m)	SELLADO (cm) ⁽¹⁾	Pernos eL(m)xer(m) ⁽²⁾	SH-35 ⁽¹⁾ (cm)	LG 70/32/22	OTROS
I	>65	>5.0	3 (*)	2.5 x 2.0	-	-	(*) Sólo en clave
II	55-65	4.0	3	2.0 x 1.5	-	-	-
III	45-55	3.0	3	1.5 x 1.5	5	-	-
IV	35-45	1.5	3	-	14	@ 1.5	-
V	25-35	1.0	3	-	14	@ 1.0	Paraguas ligero l = 6 m; Pernos autoperforantes R32
VI	<25	0.75	3	-	17	@ 0.75	Machón central Paraguas ligero l = 6 m; Pernos autoperforantes R32 Contrabóveda

(1): H-35 con fibra de polipropileno 3kg/m³.
 (2): Pernos corrugados o helicoidales lechados en toda su longitud. D=22mm; L = 2.0 m

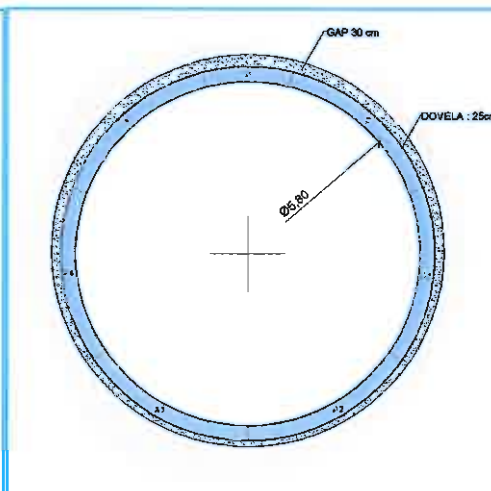
[TABLA I] .- Características de los diferentes tipos de sostenimiento.



[Fig. 12] .- Trazado para la construcción de los túneles Pucará y Transandino mediante tuneladora.



[Fig. 13] .- Definición geométrica del túnel Pucará para su ejecución mediante TBM abierta.



[Fig. 14] .- Definición geométrica del túnel Transandino para su ejecución mediante Doble Escudo.

y una solera de concreto de 15 cm de espesor.

El *shotcrete*, con objeto de mejorar su capacidad a tracción y para disminuir su coeficiente de permeabilidad, deberá contar con una dosificación de 3 kg/m³ de fibras sintéticas.

Una vez hayan finalizado las labores de construcción de los túneles Pucará y Transandino y previamente a su puesta en funcionamiento, deberán ejecutarse sendos tapones de concreto en los entronques entre los túneles y su respectivo Adit, con el objeto de permitir el correcto comportamiento hidráulico.

Este tapón se materializa mediante un relleno de concreto en los metros iniciales del adit.

Agradecimientos

Queremos agradecer al equipo de COBRA y COSAPI (Consortio Angostura-Siguas) su colaboración para la realización de este artículo.

Bibliografía

- GALERA, J.M., ALAMÁN, P., IBARRA, G., QUIROGA, C. *EXPERIENCIAS EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN LA CORDILLERA ANDINA*. Horizonte Minero, Perú, 2011.
- PAUL, A., ODEKERKEN, C., MEYER, P., CHAVEZ, E., GALERA, J.M., MÜLLER, M. *THE CONSTRUCTION OF THE HYDROELECTRICAL PROJECT LA CONFLUENCIA (ANDES, CHILE)*. ITA WTC 2012. Bangkok, 2012.
- CHÁVEZ, E.J.M. GALERA, G. IBARRA, C. QUIROGA Y S. VEYRAT. *RECENT EXPERIENCES IN THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF TUNNELS IN THE CENTRAL AND SOUTHERN ANDES*. ITA WTC 2013. Geneve, 2013
- BIENIAWSKI, Z.T., CELADA, B., GALERA, J.M., TARDAGUILA, I. *NEW APPLICATIONS OF THE EXCAVABILITY INDEX FOR SELECTION OF TBM TYPES AND PREDICTING THEIR PERFORMANCE*. ITA WTC 2008. Agra, 2008.

SUBTERRA INGENIERÍA, S.L
 Vallehermoso, 30 - bajo A
 28015 Madrid
 ☎: +34 915 340 530 • Fax: +34 915 331475
 E-mail: info@subterra-ing.com

SUBTERRA INGENIERÍA, Ltda.C
 José M. Infante, 2802
 7750181 Nuñoa-Santiago. Chile
 ☎: +(56) 2 2919 6912
 Fax: +(56) 2 2651 7672
 E-mail: chile@subterra-ing.com

SUBTERRA PERÚ, SAC
 José Pardo, 601. Oficina 801
 Miraflores. Lima 18 - Perú
 ☎: +(51) 1 242 3918 • F: +(51) 1 440 6656
 E-mail: peru@subterra-ing.com

Web: www.subterra-ing.com