

EL TÚNEL HIDRÁULICO 'CIPRESES' EXCAVADO EN ANDESITAS CON TBM ABIERTA EN CHACAYES-CHILE

HYDRAULIC 'CIPRESSES' TUNNEL EXCAVED IN ANDESITE BY TBM IN CHILE

Gianfranco Perri

Profesor de Túneles en la Universidad Central de Venezuela gianfrancoperri@gmail.com

Luis J. Zurbaran

Ingeniero Geólogo de Astaldi S.p.A. javierbjj79@gmail.com

RESUMEN

El Túnel Cipreses con una longitud total de 2.568 m y un diámetro de aproximadamente 5 m, fue excavado mediante TBM bajo una cobertura máxima del orden de los 200 m para las obras del proyecto hidroeléctrico Chacayes, ubicado al sur de Santiago de Chile. La TBM abierta utilizada fue una WIRTH TB 400/500 E, con diámetro nominal de perforación igual a 5 m con una potencia de hasta 1280 kW y torque máximo de 1295 kNm. El túnel Cipreses está emplazado dentro de formaciones volcánicas y vulcano-clásticas y los afloramientos de roca se exponen en forma extensa en la zona de ambos portales: brechas y andesitas competentes de un lado y andesitas competentes en el otro lado. Una serie de circunstancias críticas fueron encontradas durante el avance y finalmente exitosamente resueltas, no obstante las inesperadas cuanto singulares condiciones geológicas. Después de más de la mitad del túnel, se interceptó un paleocauce: un lecho de río conformado por boulders sub-redondeados de diversos diámetros hasta 200 cm, embebidos en una matriz arena limosa con un nivel medio de cementación y escasa capacidad de autoapoyo. Esta situación acompañó la excavación durante 85 metros, que fueron exitosamente excavados con la inmediata aplicación de pesados y múltiples soportes.

ABSTRACT

Cypress Tunnel with a total length of 2,568 m and a diameter of 5 m was excavated by TBM maximum coverage under the order of 200 m for hydroelectric project works Chacayes, located south of Santiago, Chile. The open TBM used was a TB WIRTH 400/500 E, with a nominal diameter equal to 5 meters with power of up to 1280 kW and maximum torque of 1295 kNm. Cypress tunnel is located within volcanic formations and volcano-clastic and exposed rock outcrops of competent andesitic, extensively in the area of both sites. A series of critical circumstances were encountered during the progress and finally successfully resolved, notwithstanding the unexpected as unique localized geological conditions. After to have excavated more than half of the tunnel, the TBM intercepted a paleo-a riverbed composed of sub-rounded boulders of various sizes up to 200 cm, embedded in a silty sandy matrix with a medium level of cementation and no capacity for self-support. This accompanied the excavation for 85 m, which were successfully excavated with the immediate application of many heavy supports.

INTRODUCCION

El túnel Cipreses del Proyecto Hidroeléctrico Chacayes en Chile, de 2.568 metros de longitud, fue excavado mediante TBM abierta partiendo del portal de salida.

Este túnel, ya construido y operativo, es el primero de una serie de cuatro túneles excavados convencionalmente, que conducen las aguas del río Cipreses hasta la casa de máquinas para la generación de electricidad.

La longitud total del túnel Cipreses es 2568,01 metros. La longitud excavada por método Drill & Blasting es 200,74 metros, en su inicio desde el portal de salida. La longitud excavada por método Tunnel Boring Machine es 2367,27 metros. La fecha del inicio de la excavación fue el 08 de Agosto del 2009 y la fecha del fin de la excavación fue el 31 de Agosto del 2010: un año.

El proyecto del túnel anticipaba condiciones geológicas estándares para un macizo rocoso andesítico bastante masivo, basado en los resultados de la geología de superficie y en la relativamente baja cobertura del túnel, la cual alcanzaría escasamente los 200 metros al máximo.

Por lo anterior y considerando las dificultades de acceso para los equipos exploratorios a lo largo del trazado, no se efectuaron perforaciones diagnósticas.

Sin embargo, durante la excavación se interceptó una geología compleja e inesperada, caracterizada por la presencia de un par de paleocauces conformados por cantos y bolones subredondeados de diversos diámetros (de 5 cm hasta 200 cm) embebidos en una matriz arenolimoso con un nivel medio de cementación y con escasa capacidad de autoporte.

Esta situación inesperada, compleja y riesgosa, acompañó el desarrollo de la excavación durante un total de unos 85 metros en los cuales los avances diarios pasaron a ser centimétricos y aplicando exitosamente procedimientos que permitieron la inmediata aplicación de elementos de soportes en el perímetro de la excavación para garantizar la estabilidad del túnel.

Más en general, el túnel fue excavado en configuraciones litológicas y estructurales variadas que, en cuanto a litologías incluyeron, además de los ya comentados muy localizados pero problemáticos e inesperados depósitos cuaternarios, varias rocas volcánicas con resistencia a la compresión confinada de hasta 30 y 70 MPa: principalmente andesíticas, brechas, tobas y diques de composición basáltica y andesítica.

En cuanto a las estructuras, las que se encontraron estaban intrínsecamente relacionadas a los procesos paleogeológicos y de formación del macizo: la exfoliación de la roca, las zonas de fracturamiento abierto y las zonas de cizallamiento. El diaclasamiento presentó por lo general disposición ortogonal, pero hubo presencia de pseudoestratificación con tendencia horizontal que generó ocasionalmente relajamiento de bloques con geometría angulosa tipo lascas o planchones.

Se manifestaron localizados flujos de aguas abundantes por periodos cortos, se presentaron aureolas de alteraciones químicas en la roca y se observaron contactos litológicos abruptos y transicionales con franjas de alteración.

De acuerdo con el índice geomecánico RMR, la distribución global de la calidad geomecánica encontrada a lo largo de los 2.367 metros excavados con la TBM, presentó el cuadro siguiente: 1% en Clase I – 76% en Clase II – 19% en Clase III – 1% en Clase IV y 4% en Clase V.

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA TBM

La TBM abierta utilizada en la excavación del túnel Cipreses fue una WIRTH TB 400/500 E, una tuneladora abierta con diámetro nominal de perforación igual a 5,01 metros con una potencia de hasta 1280 kW y torque máximo de 1295 kN m. Se trata de una máquina comúnmente identificada de tipo kelly. Ver el esquema de la TBM en la Figura 1.

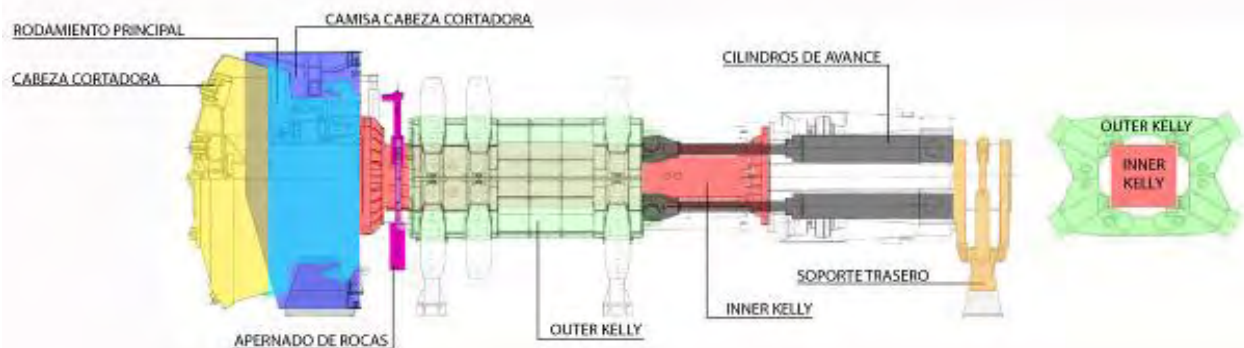


Figura 1: Esquema de la TBM WIRTH utilizada para la excavación del túnel Cipreses

El área frontal de la máquina incluye el rodamiento principal y la cabeza cortadora, y está rodeada y soportada por una estructura de escudo flotante. El kelly externo soporta el grupo de zapatas (grippers) y el kelly interno está suspendido entre el soporte trasero y el rodamiento principal en el frente. Los accionamientos de la cabeza cortadora están situados en la parte trasera del kelly interno para obtener el máximo espacio para el equipo apernador situado directamente detrás de la cabeza cortadora. Los cilindros de avance o empuje conectados al kelly interno y al externo también están situados hacia la parte trasera para mantener un espacio adicional en la zona frontal de la máquina. Ver la fotografía de la TBM en la Figura 2.

La cinta transportadora para el material al frente está situada en el centro de la tuneladora y dispone de un accionamiento hidráulico de velocidad variable. El sistema recoge el material cortado por la cabeza de la TBM y lo lleva al punto de descarga situado en la parte trasera de la tuneladora donde el material se lleva al transportador del sistema de rezaga el cual se efectúa hacia el exterior se hace por tren con un ancho de trocha de 750 mm.

El Back-up, conectado y desplazado hacia adelante por la tuneladora por medio de un dispositivo de arrastre de accionamiento hidráulico, está constituido por una estructura de pórtico circulando sobre trineos o rieles auxiliares alojando todo el equipo de alimentación de la máquina y el sistema de traslado del material. El conjunto consta de 2 trineos, 3 puentes y 7 carros de pórtico que circulan en los rieles auxiliares colocados conjuntamente con los rieles de túnel instalados aproximadamente unos 60 a 80 m detrás del frente de excavación del túnel.

La unidad de empernado permite realizar perforaciones para la instalación de los pernos del soporte durante el funcionamiento y avance de la TBM. Las perforaciones cubren la zona superior de la excavación en un sector angular de aprox. 240°. El sistema incluye dos mesas móviles longitudinalmente en el kelly externo con un dispositivo de apoyo giratorio integrado donde están colocados los dos equipos de perforación.



Figura 2: TBM WIRTH en fase de montaje al exterior del Portal de Salida del túnel Cipreses

GEOLOGÍA Y GEOMECÁNICA DE LA EXCAVACIÓN

Se describen y se ilustran a continuación, las condiciones geológico-geomecánicas encontradas a lo largo de las excavaciones del túnel efectuadas con la TBM, desde las correspondientes a situaciones óptimas en las de las Clases de excavación I y II, a las situaciones intermedias en las Clases de excavación III y IV, hasta las condiciones extremadamente críticas finalmente encontradas en la Clase de excavación V.

En la Figura 3: Tramo excavado en roca andesita de coloración gris, textura fina, escaso fracturamiento, excavación completamente seca: Clase I.

En la Figura 4: Tramo excavado en roca tobacea de coloración rojiza, textura media a fina, fracturamiento escaso, excavación con humedad incipiente: Clase I.

En la Figura 5: Tramo excavado en roca brechoide, textura media, fracturamiento moderado, halos de alteración de coloración verdoso-gris, excavación con humedad asociada a fracturas con aberturas milimétricas y centimétricas: Clase II.

En la Figura 6: Frente de brecha volcánica fresca, excavación con escasa humedad: Clase II.

En la Figura 7: Tramo excavado en roca brechoide que presenta intenso fracturamiento con rellenos blandos entre juntas que define cuñas y bloques potencialmente inestables: Clase III.

Figura 8: Tramo excavado en roca brechoide fracturada y muy alterada. Ver el detalle del fracturamiento intenso en una zona de contacto entre la brecha y la toba: Clase IV.

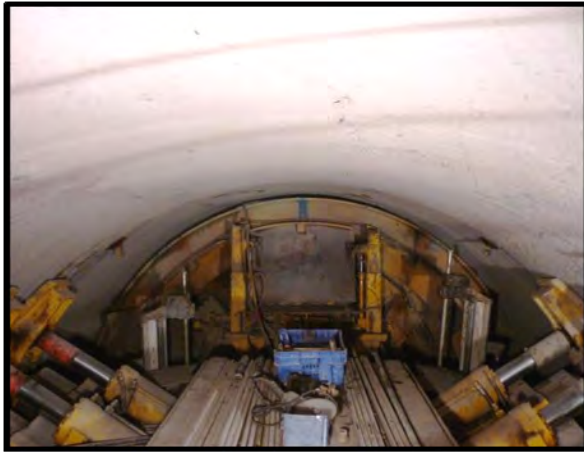


Figura 3: Clase I



Figura 4: Clase I



Figura 5: Clase II



Figura 6: Clase II



Figura 7: Clase III



Figura 8: Clase IV

En las Clases de excavación III y IV, las características más resaltantes observadas fueron el intenso grado de fracturamiento con presencia de relleno blando y la abundante humedad. Las familias de diaclasas definieron patrones ortogonales generando bloques y cuñas potencialmente inestables los cuales fueron debidamente desquinchados y fortificados. Además, debido a la disposición subhorizontal de la pseudoestratificación se manifestaron en la clave de la sección frecuentes desprendimientos de escamas rocosas, conchas de rocas laminares, consecuencias de la descompresión por efecto gravitatorio ocasionándose inestabilidades localizadas en la clave lo que obligó a realizar frecuentes desquiches y una más intensa fortificación de la excavación con perno para estabilizar los bloques potencialmente inestables, así como la eventual aplicación de malla electrosoldada y concreto proyectado.

La presencia de agua se manifestó de manera intermitente durante la excavación en lugares puntuales con aporte de volúmenes considerables que no fueron constantes, estos aportes de flujo de agua sin transporte de sedimentos en suspensión estaban netamente asociados a zonas de fracturas abiertas en el macizo. Un primer evento importante ocurrió en el inicio del mes de febrero 2010 con un caudal máximo de 4.287 m³/d equivalente a 49,6 l/seg y un segundo evento ocurrió en el inicio de abril 2010 con un caudal máximo de 6.500 m³/d equivalente a 75,2 l/seg.



Figuras 9 y 10: Flujos de agua desde las fracturas y volúmenes de agua acumulados en el frente

Las condiciones descritas, correspondientes a las Clases de excavación I-II-III-IV, fueron superadas sin mayores incertidumbres y, como previsto, mediante acciones y procedimientos de rutinas con rendimientos muy satisfactorios, pero, luego de haber superado abundantemente la mitad de la longitud total de la excavación, se encontraron dos tramos muy especiales en los que las condiciones geológicas resultaron totalmente imprevistas: un primer tramo largo unos 20 metros y un segundo tramo largo casi 70 metros y separados entre sí cerca de 300 metros: se interceptaron depósitos cuaternarios de material aluvial, unos paleocauces de matriz areno-limosa ocasionalmente arcillosa, con textura conglomerática y con la presencia de cantos y bolones rocosos, todo lo cual ocasionó serios problemas a las labores de excavación y soporte del túnel.

SOPORTES INSTALADOS EN LAS CLASES V

La fotografía de la figura 11 muestra la presencia de una acumulación de cantos redondeados en la parte superior del frente y techo de excavación y las tres fotos que siguen, figuras 12 - 13 y 14, ilustran algunos de los impresionantes bolones que fueron extraídos enteros y casi manualmente. En otros casos, bolones similares fueron fracturados en el sitio para luego ser maridados, ya que ocupaban posiciones en relación al frente, que imposibilitaban su remoción por entero.



Figura 11



Figura 12



Figura 13



Figura 14

En los tramos del túnel excavados en estas condiciones, dentro los paleo depósitos cuaternarios, inicialmente se procedió limitando los avances a muy pocas decenas de centímetros cada vez, para así poder instalar la pesada fortificación prevista, conformada por arcos metálicos y concreto proyectado, de manera inmediata para evitar todo posible relajamiento del terreno: ver el esquema en la figura 15 y las fotos de las figuras 16 y 17.

Al mismo tiempo se procedió a instalar estaciones de monitoreo continuo de las convergencias, en consideración a la elevada incertidumbre acerca de la magnitud de las presiones que pudieran luego desarrollarse sobre el soporte y para poder por lo tanto eventualmente decidir a tiempo de intervenir para reforzar los soportes y evitar su colapso.

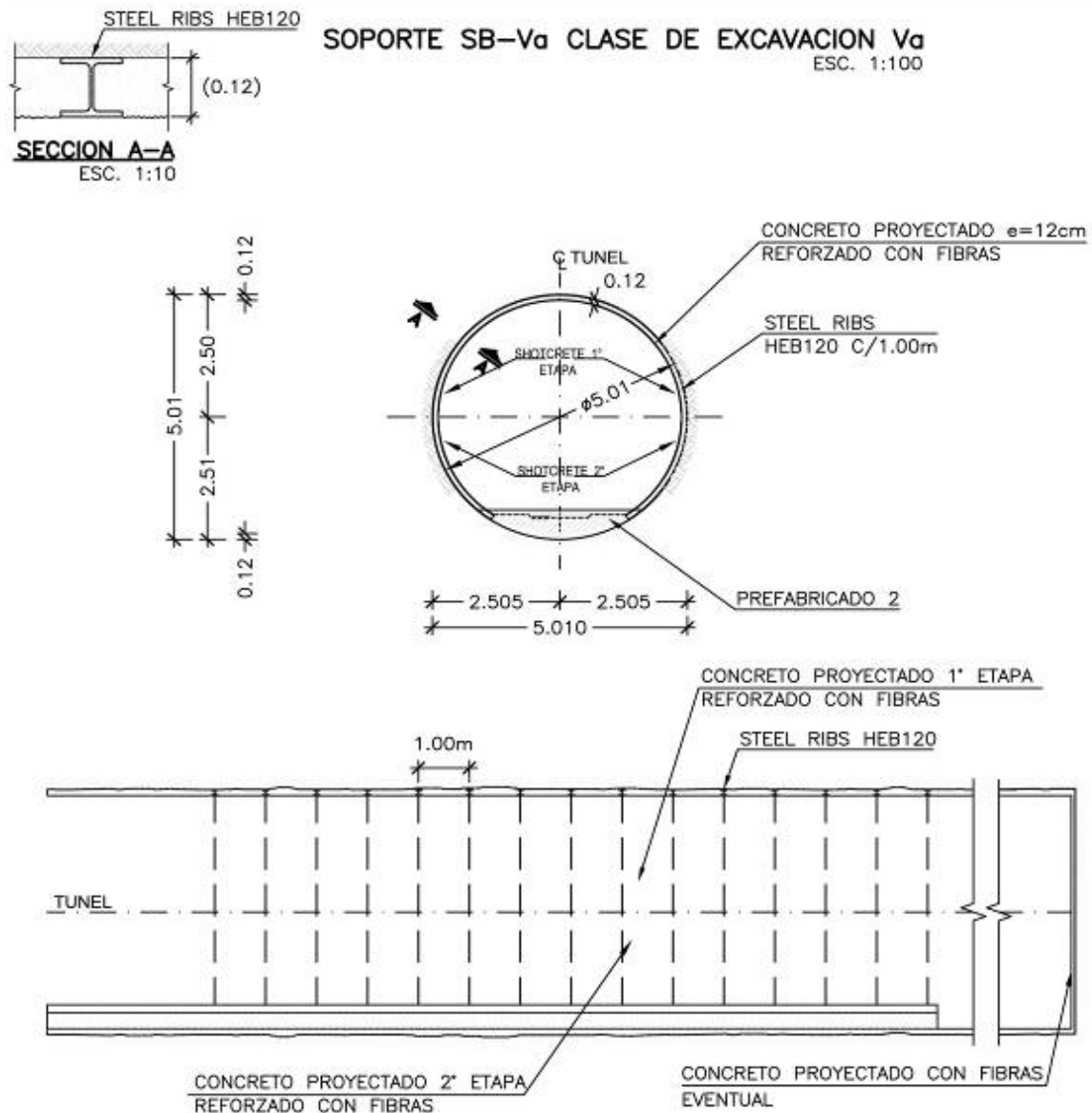


Figura 15: Soportes del túnel instalados en los avances de la Clase de excavación Va

Tales procedimientos permitieron superar satisfactoriamente, aunque lentamente, el primer paleoauce interceptado, cuya extensión en términos de metros lineales de túnel alcanzó los 20 metros. Las labores duraron casi 10 días, con un avance promedio de un par de metros por día.



Figura 16: Clase Va



Figura 17: Clase Va

En el segundo paleocauce, que fue encontrado a unos 300 metros lineales de túnel del primero, después de avanzar una treintena de metros tales medidas se consideraron insuficientes para atravesarlo, ya que la exploración ejecutada desde el frente indicó una mayor extensión y mayores dimensiones de los bolones a remover con el avance: un cuadro muy crítico que hizo considerar peligroso para la estabilidad de la excavación el proceder aplicando el mismo tipo de soporte del primer paleocauce, el cual aún sin llegar a colapsar había manifestado ciertos niveles de criticidad por lo cual había sido reforzado localmente después del paso de la TBM.

Se optó por fortalecer el soporte y eventualmente complementarlo con la instalación un pre-soporte constituido por paraguas de 16 micropilotes largos 6 metros, avanzando 4 metros a cada módulo e instalando, a cada 50 o 75 cm, el marco metálico, el concreto proyectado y eventuales pernos radiales. Y así para cada ciclo o módulo, hasta tanto la situación lo permitiera, o mejorara.

Los micropilotes requerían perforaciones de 101 mm de diámetro, barras helicoidales de 73 mm de diámetro, lechada cementante inyectada a 5 bares. Los marcos metálicos colocados fueron del tipo HEA 140 con f_y de 360 MPa. El concreto proyectado fibroreforzado aplicado con 20 cm de espesor y de 35 MPa de resistencia nominal. Los pernos metálicos de alta resistencia de 3 metros de largo y diámetro de 25 mm.

Se encontraron notables dificultades en conformar los paraguas de micropilotes, pero finalmente los aproximados 70 metros lineales de extensión de este segundo paleocauce, pudieron ser excavados y se requirieron para ello en total unos 32 días calendarios, con un avance efectivo promedio en este tramo de poco más de un par de metros por día.

Solamente la gran experiencia, la firmeza y la gran voluntad de los técnicos y de los operarios encargados de la excavación, permitieron llevar a cabo satisfactoriamente el excepcional logro (Figura 18). También la TBM abierta comprobó su versatilidad frente a una situación definitivamente y críticamente atípica, permitiendo poder intervenir el frente de excavación de manera no mecanizada, pero finalmente útil a superar una criticidad severa, aunque relativamente limitada en extensión.

Finalmente, y una vez más, la geología reveló que al emprenderse obras subterráneas no pueden existir certezas absolutas, ya que nunca es excluible la sorpresa o la atipicidad, ni si quiera dentro contextos aparentemente homogéneos y bajo profundidades relativamente limitadas. Las capas volcánicas que afloran además, pueden haber recubierto realidades que han podido quedar completamente tapeadas y sin haber dejado rastro alguno en la superficie.



Figura 18: 31 Agosto 2010

REFERENCIAS

PERRI G. (1998) “Umbrella Arch: En el Ferrocarril Caracas-Cúa un método constructivo para túneles en terrenos difíciles basado en la versión moderna de la técnica del Marchavanti”. Boletín Sociedad Venezolana de Geotecnia N.74, Caracas-Venezuela.

PERRI G. (2012) “TÓPICOS DE INGENIERÍA DE TÚNELES” 500 páginas
http://issuu.com/gianfrancoperri/docs/topicos_de_ingenieria_de_tuneles

ZURBARAN L.J. (2010) “Condiciones geológicas y geomecánicas que caracterizaron las excavaciones ejecutadas para construir el túnel Cipreses del Proyecto Hidroeléctrico Chacayes en Chile”. Constructora Astaldi Fé Grande Cachapoal Ltda.