



Condicionantes geológicos en el cruce de la sierra de Valle Fértil. San Juan

Geological constraints at the crossing of sierra Valle Fertil. San Juan

Aceituno Cieri, P. ¹ ✉ - Zeballos, M. E. ² - Rocca, R. J. ² - Martino, R. D. ² - Carignano, C. ² - Guerreschi, A. ² - Giambastiani, M. ²

Recibido: 19 de mayo de 2015 • Aceptado: 07 de noviembre de 2015

Resumen

La Ruta Nacional 150 cruza el norte de la sierra de Valle Fértil con una traza que sigue la quebrada del río Agua de la Peña y del arroyo León. Esta quebrada secciona el Pliégue de la Sierra Morada, y pone al descubierto parte de una de las mayores cuencas extensionales carbonífero-triásica conocidas en Argentina (Cuenca de Paganzo - Cuenca de Ischigualasto-Villa Unión), donde afloran sedimentitas depositadas en paleoambientes mayormente fluvio-lacustres.

Las sedimentitas de la Cuenca de Paganzo, de edades carboníferas a pérmicas, fueron depositadas en dos grandes depocentros, oriental y occidental, controlados por fallas en una tectónica de pull-apart. La primera formación, denominada Guandacol, fue depositada cercana a las fallas. Posteriormente, se depositó la Formación Tupe que registra una amalgamación progresiva de cuencas apiladas para llegar a formar una cuenca compleja con un piso irregular. Finalmente, durante una etapa de subsidencia gradual y máxima expansión, se deposita la Formación Patquía-De la Cuesta.

A lo largo de unos 40 km de extensión se han realizado distintas obras de arte, incluyendo seis túneles con forma de herradura de unos 70 m² de sección y cinco puentes, dos de ellos en arco.

Se analiza en detalle la influencia de las condiciones geológicas en cada sector.

Palabras Clave: Valle Fértil, túneles, taludes, Fm. Tuminico, Fm. Talampaya, Fm. Chañares.

Abstract

National Route 150 crosses the northern Sierra de Valle Fertil with a trace that follows Agua de la Peña River and Leon stream valley. This stream cut the Sierra Morada fold and exposes part of one of the largest Carboniferous-Triassic extensional basins known in Argentina (Paganzo Basin - Ischigualasto-Villa Union Basin). Their sedimentary outcrops were mostly deposited in fluvial-lake environment. Paganzo Basin sediment with Carboniferous to Permian age, were deposited

in two large depocentres, Eastern and Western, controlled by faults in a pull-apart tectonic. The first formation, called Guandacol was deposited close to faults. Subsequently, the formation Tupe was deposited with a gradual amalgamation of stacked basins to eventually form a complex basin with an

1. Dirección Nacional de Vialidad. D. San Juan.

2. Universidad Nacional de Córdoba. CV- F.C.E.F.N

✉ paula_cieri@hotmail.com

irregular floor. Finally, during a stage of gradual subsidence and maximum expansion, Patquía-De la Cuesta formation was deposited.

The route has 40 km long with several infrastructure works, including six tunnels with horseshoe-shaped section 70 m² and five bridges, two of them are arch bridges.

It is analyzed in detail the influence of the geological conditions in each sector.

Keywords: Valle Fértil, tunnels, slopes, Fm. Tuminico, Fm. Talampaya, Fm. Chañares.

INTRODUCCION

La Sierra de Valle Fértil esta localizada en el este de la Provincia de San Juan. Ha sido cruzada por la Ruta Nacional 150, que forma parte del corredor bioceánico que corre desde Puerto Alegre (Brasil) hasta La Serena (Chile) (Figura 1)

A lo largo de unos 40 km de extensión se han realizado distintas obras de arte siendo las principales, seis túneles con forma de herradura de unos 70 m² de sección con un total de 2000 metros y cinco puentes, dos de ellos en arco.

En el trabajo se analiza en detalle la influencia de las condiciones geológicas en cada sector, sobre las distintas obras que se han ejecutado.

CONDICIONES GEOLÓGICAS

La Ruta Nacional 150 cruza el norte de la sierra de Valle Fértil a través de una traza que sigue principalmente la quebrada del río Agua de la Peña y de su afluente, el arroyo León. Esta quebrada secciona el Pliegue de la Sierra Morada, y pone

al descubierto parte de una de las mayores cuencas extensionales carbonífero-triásica conocidas en Argentina (Cuenca de Paganzo – Cuenca de Ischigualasto-Villa Unión), donde afloran sedimentitas depositadas en paleoambientes mayormente fluvio-lacustres (Figura 2). La traza se encuentra dentro de la Reserva Natural de Ischigualasto, por lo que tiene restricciones ambientales.

Estratigrafía General

Las sedimentitas de la Cuenca de Paganzo, de edades carboníferas a pérmicas, fueron depositadas en dos grandes depocentros, oriental y occidental, controlados por fallas en una tectónica de *pull-apart* en la región central de Argentina. La primera formación, denominada Guandacol, fue depositada cercana a las fallas. Posteriormente, se depositó la Formación Tupe que registra una amalgamación progresiva de cuencas apiladas para llegar a formar una cuenca compleja con un piso irregular. Finalmente, durante una etapa de subsidencia gradual (*sag*) y máxima expansión, se deposita la Formación Patquía-De la Cuesta.



Figura 1. Ubicación del proyecto, remarcado en el este de San Juan.

Las formaciones Guandacol y Tupe pertenecerían a un complejo fluvio-deltaico continental y lacustre profundo, con transición a facies marinas. Las condiciones climáticas habrían variado de glacial-interglacial (Guandacol) a periglacial (Tupe). La Formación Patquía-De la Cuesta sería fluvial, de cursos entrelazados y de alta sinuosidad establecidos en un régimen climático cálido, árido y oxidante hasta tal punto que se desarrollan eolianitas.

En la quebrada del río de Agua de La Peña se han reconocido sedimentitas equivalentes a la Formación Tupe denominadas Formación Tuminico.

Formación Tuminico

Las sedimentitas de la Formación Tuminico están formadas por conglomerados, areniscas arcósicas, grauvacas, limolitas y lutitas pertenecientes a ciclos fluviales de tipo anastomosado y meandriforme, con episodios deltaicos y lacustres. Se reconocen restos de plantas fósiles que permiten asignarle a la Formación Tuminico una edad carbonífera media a superior (Tabla 1).

La secuencia cubre en discordancia angular a los granitoides y las metamorfitas de la Sierra de Valle Fértil, truncada por una discordancia angular, sobre la que se apoyan estratos rojos de las formaciones Talampaya y Tarjados. En otros lugares de la cuenca se han identificado coladas de basaltos olivínicos alcalinos, aglomerados y tobas entre el Carbonífero y el Triásico.

Sobre la Formación Tuminico, en distintas litologías, se desarrolla el tramo del camino donde se emplaza el Túnel 7.

Cuenca de Ischichuca-Villa Unión

Las sedimentitas de la Cuenca de Ischichuca-Villa Unión, de edad triásica, se han depositado en una depresión elongada NO-SE producida por una tectónica extensional que generó una geometría en hemigraben, cuyo margen activo fue el lineamiento Valle Fértil ubicado al oeste. Estas sedimentitas se encuentran muy bien desarrolladas en los bolsones del Bermejo y Pagancillo y se exponen entre el Cerro Bola y la Hoyada de Ischigualasto. A la altura de la quebrada del río Agua de la Peña se puede apreciar casi toda la secuencia completa de este Triásico continental único en el mundo.

La cuenca está compuesta por dos unidades estratigráficas bien diferenciadas entre sí: las formaciones Talampaya y Tarjados y el Grupo Agua de la Peña integrado por las formaciones Ischichuca (incluyendo la Formación Chañares), Los Rastros, Ischigualasto y Los Colorados (Tabla 2).

Formaciones Talampaya y Tarjados

La Formación Talampaya sobreyace en discordancia angular sobre el Pérmico (aunque en la quebrada del río Agua de la Peña lo hace sobre Carbonífero), mientras que una discordancia erosiva la separa de la Formación Tarjados. Conjuntamente están formadas por areniscas rojas de grano fino, rojo pálido (Talampaya) sobrepuestas por la discordancia mencionada por conglomerados y areniscas rojizas seguidas por areniscas blanquecinas finalizando en un nivel de fanita (Tarjados).

El ambiente de depositación de la Formación Talampaya tendría tres secuencias depositacionales de la sección inferior a la superior: facies de abanicos aluviales, flujos de detritos,

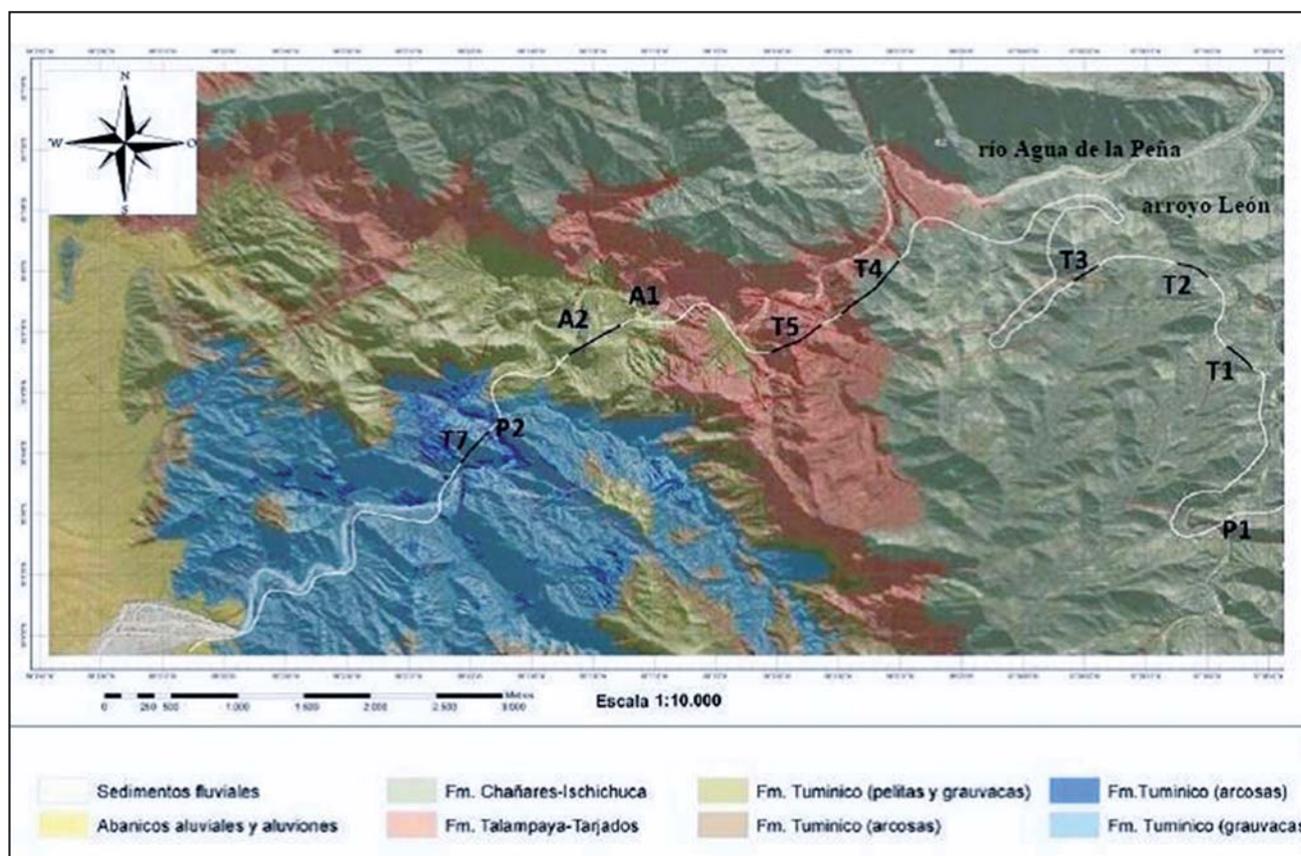


Figura 2. Ubicación de Túneles (Ti), Puentes (Pi) y Puentes en Arco (Ai) en los distintos ambientes geológicos.

Tabla 1. Columna estratigráfica de la Formación Tuminico (Cuerda et al. 1979).

EDAD	Espesor (m)	LITOLOGIA	ESTRUCTURAS	PALEOAMBIENTES
Carbónico Medio a Superior	M 205	Arenisca de grano fino laminadas	Rodados rocas metamorficasLenticular	lacustre
	L 230	Areniscas de grano grueso	Rodados rocas metamorficas Erosivo	
	K 127	Areniscas y conglomerados		corriente de barro lacustre
	J 86	Areniscas de grano fino	Lenticular	lacustre fluvial
	I 383	Areniscas de grano grueso con brechas y conglomerados	Erosivo	
	H 233	Areniscas de grano fino laminadas con conglomerados	Bloques 2 m diámetro laminación plegada	fluvial meandriforme
	G 274	Areniscas de grano fino, laminados	Erosivo Tangencial	ciclo fluvial
	F 112	Areniscas de grano fino		lacustre
	E 112	Areniscas de grano fino con ondulitas		canales interdistribuidos
	D 425	Areniscas de grano grueso con conglomerados y brechas	Plegamiento sin sedimentario Erosivo Artesa Arcosas Erosivo	anamostomado a meandriforme
	C 124	Areniscas de grano grueso	erosivo	
	B 212	Lutitas con areniscas de grano fino, laminados	falla erosiva arcosas	fluvial meandriforme
A 150	Areniscas de grano grueso con brechas	fluvial anastomosado		
Pre-Cámbrico		Gneiss tonalítico ambibolita		

Tabla 2. Columna estratigráfica del Triásico de la Cuenca Ischigualasto (Stipanovic, 2002).

Formaciones cretácicas y terciarias			
<i>discordancia angular</i>			
Grupo AGUA DE LA PEÑA	formación LOS COLORADOS (100 - 1000 m)	Superior	segundo postrift
		Inferior	
	Formación ISCHIGUALASTO (200 - 900 m)	Superior	segundo sinrift
		Inferior	
(575 -3600 m)	Fm. LOS RASTROS (200 - 1000 m)		primer postrift
	Fm. ISCHICHUCA (incluye Fm. CHAÑARES) (75 - 750 m)		primer sinrift
<i>discordancia angular</i>			
PAGANZO III (600 m)	Fm. TARJADOS (0 - 250 m)		
	Fm. TALAMPAYA (0 - 400 m)		
<i>discordancia angular</i>			
Basamento cristalino precámbrico, sedimentitas neocarboníferas y eopermicas			

barreales y sedimentos eólicos; siguen depósitos aluviales entrelazados con algo de materiales eólicos e intercalaciones de basaltos. La Formación Tarjados sería de origen aluvial con participación eólica menor.

Los Túneles 5 y 4 se emplazan dentro de estas formaciones.

Grupo Agua de la Peña

A los fines de brevedad, sólo se describirán las formaciones Ischichuca y Los Rastros que afectan a las obras.

Las formaciones Ischichuca y Los Rastros tienen distintas facies y representarían diferentes situaciones paleogeográficas de un mismo sistema depositacional (fluvio-deltaico-lacustre). La primera está dominada por pelitas negras (facies lacustres) y areniscas finas a gruesas con un arreglo granodecreciente. El ambiente correspondería a facies distales de sistemas fluvio-deltaico-lacustres. En transición, se pasa a la Formación Los Rastros formada por areniscas verdosas dominantes y pelitas carbonosas de ambientes fluviales y deltaicos. Hacia la parte superior, los depósitos fluviales se canalizan en cuerpos arenosos-conglomerádicos con estratificación cruzada y en artesa. El conglomerado de las Peñas pertenecería a estos niveles conglomerádicos.

Los Túneles 3, 2 y 1 se emplazan en estas formaciones.

Estructura General

Esta zona se ubica en el norte de la Sierra de Valle Fértil, localizada en el borde de las Sierras Pampeanas Occidentales, en la zona limítrofe con la Precordillera, a lo largo de una megaestructura tectónica que marca el límite entre ambas provincias geológicas y que habría sido activa desde épocas paleozoicas. Esta megaestructura, conocida como lineamiento Valle Fértil, ha sido reactivada a fines del Terciario por la compresión Andina (Rosello et al 1996).

La configuración tectónica que presenta es la responsable del actual estilo estructural de deformación de zócalo (*thick-skinned tectonic*) en el ámbito de la Sierras Pampeanas, es decir bloques de basamento ascendidos y limitados por profundas y antiguas fallas que han sido reactivadas en el Terciario, deformando por plegamiento/fallamiento la cobertera sedimentaria, que no se desacopla en la deformación sino que acompaña al basamento durante ese proceso.

El principal efecto de la orogenia Andina es la producción de cuencas de antepaís generadas por sobrecarga tectónica, rellenas con sedimentos continentales, que se superponen a cuencas sedimentarias previas. Por debajo de los sedimentos terciarios de antepaís se preservan, de modo discontinuo, sedimentitas depositadas en cuencas extensionales carboníferas, pérmicas y triásicas.

Por esta causa, los bolsones y relictos de aquellas cuencas conservados en los bloques elevados de las sierras, preservan características estructurales extensionales heredadas de los procesos paleozoicos-mesozoicos y compresivas de los procesos andinos cenozoicos.

El lineamiento Valle Fértil se dispone con un rumbo NNO-SSE a lo largo de más de 700 Km y se lo reconoce tanto en superficie como en subsuelo por el alineamiento de varios pliegues anticlinales que deforman sedimentitas mesozoicas y exhiben núcleos de sedimentitas neopaleozoicas o basamento cristalino.

Las sedimentitas carboníferas-triásicas en la quebrada del río Agua de la Peña están plegadas siguiendo un anticlinal, con eje buzante al norte con bajos ángulos y plano axial subvertical, ambos orientados hacia el NNO. En profundidad, el pliegue anticlinal de la Sierra Morada ha sido interpretado como efecto de una estructura en flor positiva nucleada en el basamento como reactivación del lineamiento Valle Fértil.

Sobre el flanco oriental del pliegue, orientado con un rumbo general NO a E-O, localmente con buzamientos entre 10-25° al ENE, se encuentra la discordancia angular entre el Carbonífero y el Triásico. Esta discordancia angular actualmente inclina 10-15° hacia el este, siendo oblicua con muy bajo ángulo con el plano de estratificación de las sedimentitas carboníferas. Por encima, se disponen las sedimentitas triásicas que inclinan 20-25° hacia el este.

En el flanco descripto, dominado por una estructura planar penetrativa (plano S_0 de sedimentación-estratificación) y afectado por fracturamiento, diaclasado y fallamiento, se disponen la traza la Ruta Nacional N° 150.

DESCRIPCION DEL PROYECTO

El diseño de la traza sigue los lineamientos modernos de caminos de montaña.

Los túneles tienen la misma sección en forma de herradura de unos 12 metros de ancho y 8 metros de altura, aproximadamente. La porción circular tiene un radio interno de 5.68 m. El área es de alrededor de 70 m², que incluye la calzada y sectores laterales. El gálibo mínimo, en sentido vertical es de 5,25 m. Fueron diseñados siguiendo los criterios del manual del PIARC de "Diseño de Secciones Transversales para túneles carreteros bidireccionales" de 2004.

Se adoptó el criterio de reducir la pendiente longitudinal lo máximo posible, variando entre 1,7% (Túnel 7) a un máximo de 2,9% (Túnel 1).

El soporte de los túneles fue previsto mediante estimaciones del método RMR (Bieniawski, 1989) y Q (Barton et al, 1974). Las soluciones se dividieron en cinco casos de sostenimiento, modificados de las provisiones del método RMR. Se efectuó un seguimiento continuo del frente de excavación para verificar las condiciones reales del macizo y definir el sostenimiento a aplicar en cada caso.

En los sectores con fallas, se emplearon adicionalmente, anclajes tipo swellex y enfilados (spiling) (Aceituno Cieri et al 2014).

Para asegurar la estabilidad de la excavación en la zona de los portales de los túneles, se ejecutó un paraguas de micropilotes de 4" de diámetro, 16 m de largo y espaciados 0.4m conforme se observa en la Figura 3a.

Esta corona sirvió además para solidarizar la armadura de la viga de vinculación con la estructura de hormigón de los portales (Figura 3b).

Debido a las dimensiones de los túneles, el método de excavación utilizado consistió en la excavación en avance (bóveda) y destroza (banco). La excavación de avance se realizó mediante un piloto central de 4,5 m x 4,5 m central y posterior desquinche lateral (figura 3b).

Las excavaciones y su posterior sostenimiento fueron monitoreadas mediante mediciones de convergencia para poder verificar la estabilización de la convergencia a medida que se avanzaba con el frente del túnel.



Figura 3. a) Ejecución de paraguas de micropilotes. b) Viga de vinculación del paraguas.

COMPORTAMIENTO DE FORMACIONES

Los macizos rocosos sedimentarios presentan gran variabilidad de propiedades geomecánicas por lo que se han generado distintos problemas en cortes en laderas y en la excavación de los túneles. Las características de los mismos dependen de la orientación de las obras, con relación a la litología y geoestructuras presentes. Se describen algunos casos significativos.

Formación Tuminico (Carbonífera, grauvacas y arcosas)

El macizo rocoso perteneciente a esta formación tiene alguna variabilidad geomecánica. Los ensayos de compresión simple se encuentran en el rango de 80 Mpa mientras que la compresión diametral alcanza a 9,9 Mpa.

Afectación en obras superficiales

En un ejemplo del comportamiento se encuentra en la progresiva 34200 a 400, donde la traza tiene una orientación N 0° a N 20° de sur a norte.

Las rocas predominantes son grauvacas grises con clastos de rocas ígneas, metamórficas y de cuarzo y con clastos de areniscas blancas intensamente deformados, alargados, paralelos al plano de estratificación S₀, que está orientado N 150°/15° E.

Las principales discontinuidades son además del Plano de estratificación S₀, tres juegos de diaclasas (uno dominante) y fallas oblicuas a S₀.

El juego de diaclasas dominante denominado J1 tiene una orientación general N 212°/85° SE con un espaciado de 5-30 cm. J1 se combina con otro juego de diaclasas denominado J2, formado por planos únicos o por un conjunto de fracturas apretadas de disposición planar sin llegar a ser un clivaje de fractura. J2 se orienta N 270°/85° S y tiene un espaciado aproximado de 5 m. También lo hace con otras diaclasas denominadas J2', N 302°/70° S, también con espaciados del orden de metros. El resultado de la combinación de J1-J2 y J1-J2' es la formación de bloques en forma de cuña, de gran tamaño, alargados verticalmente, con ejes de intersección N 142°/84° y N 190°/70° respectivamente (figura 4a).

Las fallas reconocidas están orientadas N 183°/80° E y N 350°/85° O respectivamente. Ambas se hallan donde el talud cambia de rumbo a N 20°. La primera falla de las nombradas es la más importante, tiene relleno arcilloso (cm-dm).

La otra falla, casi paralela a la anterior, es de poco espesor (cm), tiene rellenos de calcita en los que se reconoce una estría orientada N 310°/75° indicando movimientos inversos con componente sinistral en planta.

Esta configuración geoestructural produce casos de volcamiento o rotacional que supone la rotación de columnas o bloques de roca, que se produce cuando dos familias de discontinuidades ortogonales convenientemente orientadas originan un sistema de bloques (figura 4b). El empuje sobre los elementos inferiores origina su desplazamiento, lo que permite la rotación de los superiores, progresando el fenómeno hasta la rotura definitiva.

Para solucionar este problema, se propuso y ejecutó la modificación de la sección transversal con contratalud en el sector indicado a un perfil con un talud 1h:2v, con bermas de 3 metros de ancho cada 10 metros de altura.

Afectación en obras subterráneas

En esta formación se emplaza el túnel 7 (de 312 m) donde se encuentran areniscas color marrón rojizas (pátina natural), formadas por grauvacas grises en corte fresco. Se presentan bien estratificadas, con estratos planares de espesor variable (0,5-0,10 m hasta 1 m). A esta estructura planar primaria se la identifica como plano S₀. Se intercalan en las grauvacas grises, pequeñas capas lentiformes de areniscas blancas, de espesores centimétricos. A veces hay clastos redondeados de estas capas.

En la entrada del túnel, las areniscas color marrón rojizas presentan grandes capas lentiformes de areniscas blancas (arcosas), de espesores métricos que se intercalan en las grauvacas grises. El plano S₀ es ondulado aquí a escala del metro.

Las principales discontinuidades son: Planos S₀, diaclasado vertical (dos juegos de diaclasas), falla directa (figura 5a).

El plano S₀ tiene una orientación media de N 116°/17° NE, con un espaciado entre 0,5-1 m.

Las diaclasas, J1 y J2, coincidentes con las diaclasas descritas para la salida del Túnel 7 (Fig. 5b), están orientadas N 200°/90° y N 300°/75° SO respectivamente. J1 está espaciada 30-45 cm, mientras que J2 lo está a 70-80 cm, un poco más que las diaclasas J2 de la salida del Túnel 7. Aquí también ambas diaclasas poseen un halo de alteración ferruginosa de unos 2 cm de espesor.

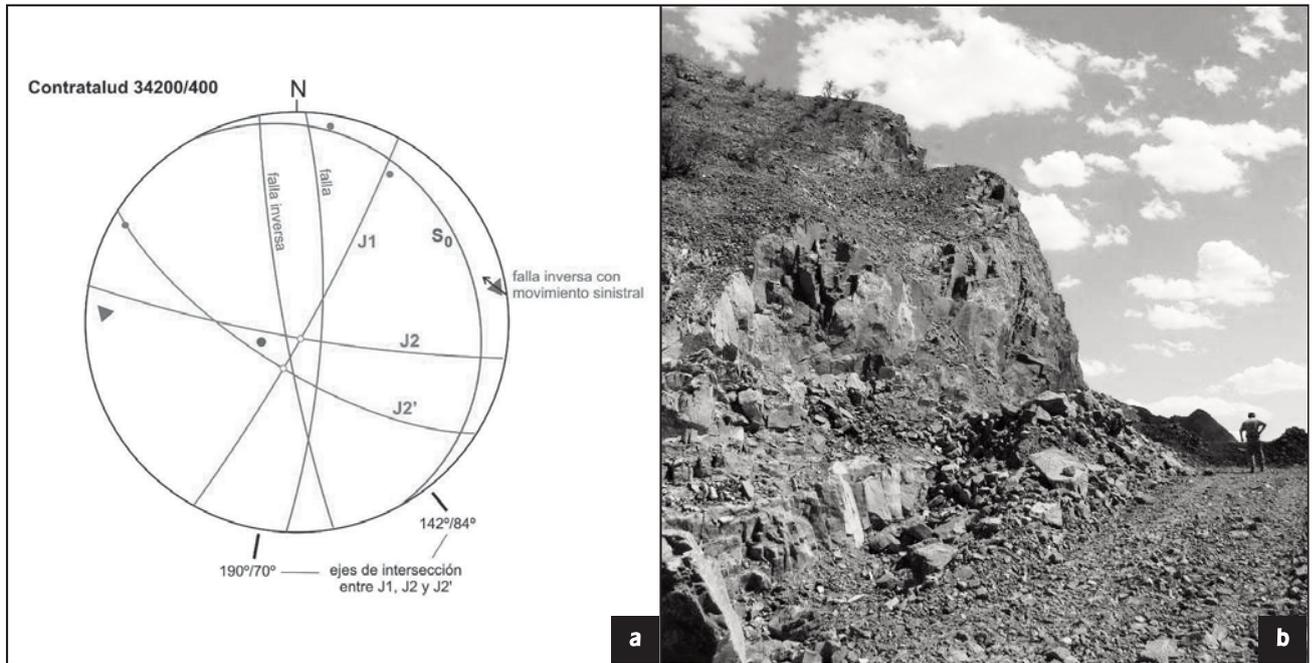


Figura 4. a) Proyección de discontinuidades. b) Vista del volcamiento.

La combinación de las dos diaclasas subverticales y el plano S_0 produce prismas alargados subverticales, de sección cuadrada o triangular. El largo de estos prismas suele ser superior al metro (figura 6).

A la entrada del túnel hay una falla de naturaleza directa, orientada N 300°/75° NE, tiene 0,50-1 m de espesor y está rellena con un material cataclastizado derivado de la arenisca, de color pardo por óxidos de hierro. Este relleno presenta un diaclasado extensional orientado N 308°/60° O. Esta falla es consistente con las que se reconocen a la salida del Túnel 7.

En la salida del T7, el plano S_0 de sedimentación está orientado N 110-140°/10-20° N, con espaciados variables entre 0,5-10 m. (Figura 5b)

Se reconocen tres juegos de diaclasas: J1, orientada N 210°/85° SE; J2, orientada N 304°/85° SO; J3, orientada N 10°/10° E. J1 es la más desarrollada, puede variar en el rumbo

y el buzamiento, presenta sus planos con una alteración ferruginosa bien marcada al igual que J2 y el espaciado es de 20-25 cm. J2 tiene un espaciado de 15-30 cm. Ambas combinadas con S_0 dan lascas de 30 x 30 cm y menores, generando bloques prismáticos triangulares o cuadrados, alargados subverticalmente de dm a m de largo. Cabe agregar que J2 suele presentar relleno de cuarzo menor a 1 cm. J3 es un juego oblicuo al conjunto y sólo reconocido a la salida del túnel en su hastial derecho; está orientada N 10°/10° E. No son planares sino que se curvan un poco hacia la clave del túnel. Esta última figura esquematiza en 3D las relaciones entre las discontinuidades de la salida del Túnel 7.

La geometría del diaclasado favoreció la sobrexcautación del túnel por formación de cuñas verticales (combinación de S_0 , J1 y J2), a lo que se sumaron la fracturación secundaria producida por explosiones (Figura 6).

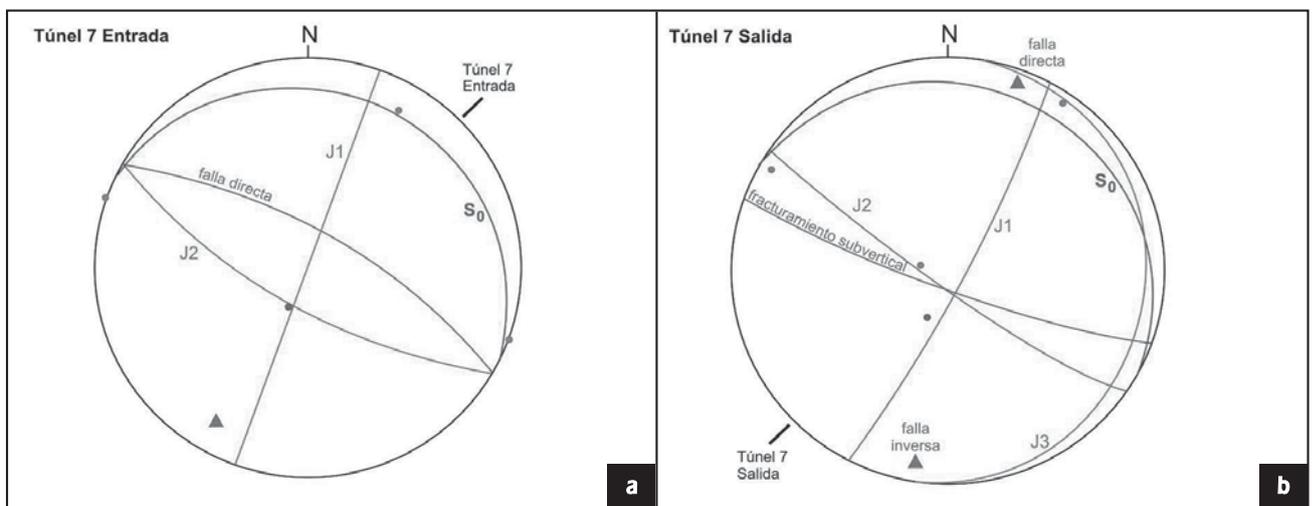


Figura 5. Proyección de discontinuidades. a) entrada y b) salida del T7.

El sostenimiento empleado consistió en anclajes pasivos y shotcrete, en espesores de los tipos 2 y 3 del sostenimiento RMR. En zona de muy baja cobertura (menos de 10 metros) por presencia de una quebrada superficial, se pasó con un túnel piloto y cerchas en toda su extensión.

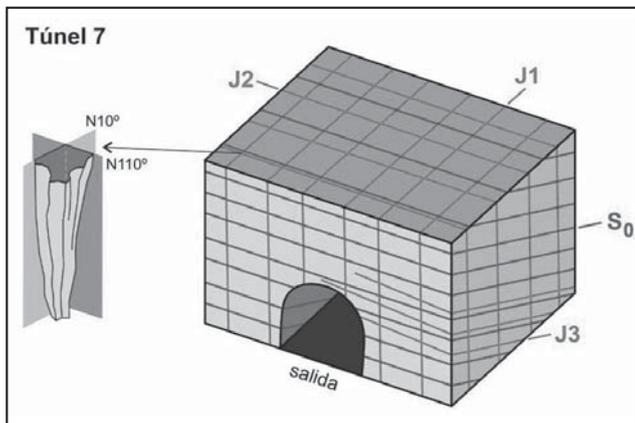


Figura 6. Block diagrama del T7 con las discontinuidades predominantes.

Formación Tuminico (pelitas)

Afectación en obras superficiales

En el caso se describe, correspondiente a uno de los estribos del puente A2, que por ser de Arco requiere niveles de deformaciones pequeños. El estribo está emplazado en un sector donde predominan areniscas finas competentes. Sin embargo, la estratificación subhorizontal de las areniscas es muy marcada con discontinuidades que se aprecian visualmente desde la margen opuesta (Figura 7).

La compresibilidad del macizo puede estimarse computando las aperturas de las discontinuidades.

Se observa que las principales discontinuidades tienen continuidad a lo largo de la excavación y por consiguiente, se prolongan por debajo del plano de fundación del estribo.

La sumatoria de las aperturas de las discontinuidades medidas en el frente de excavación está en el orden de los 40 mm. Desde el punto de vista estático, es poco probable que se cierren

cuando se la solicite externamente con las estructuras del puente.

En caso de sismo se puede producir la rotura de las asperidades que limitan las discontinuidades, produciéndose asentamientos, cuyo límite estará dado por la sumatoria de las aperturas.

Para evitar asentamientos nocivos del estribo en caso de sismo, se planteó una fundación profunda del mismo, con transmisión de las cargas por debajo de las discontinuidades, por medio de pilotes. Para materializarlos, se emplearon caños huecos de 4 pulgadas, tal como los que fueron usados en los paraguas de los portales de túneles.

Formación Talampaya-Tarjados (Triásico, areniscas y conglomerados)

La traza del camino atraviesa las distintas formaciones de areniscas y conglomerados a través de cortes a media ladera o en cajón, los que afectan la estabilidad de las mismas. Se han producido inestabilidades de bloques que abarcan una variada topología, aunque las soluciones más empleadas han sido la remoción de los mismos. Los ensayos realizados sobre muestras han arrojado una resistencia a la compresión simple de 80 Mpa y a la tracción de 4 Mpa.

Afectación en obras subterráneas

En esta formación se emplazan los túneles T5 (de 440 m) y T4 (de 542 m).

Predominan areniscas rojas con estratificación entrecruzada, con niveles de arcillas rojas y capas y lentes de material conglomerádico matriz-soportado. El espesor varía entre decímetro-metro, siendo los estratos de la entrada del túnel de mayor espesor que los de la salida.

Las principales discontinuidades son Planos de estratificación S0, diaclasas (tres juegos), fallas directas, zonas de fracturas con deslizamientos en cuña tipo graben (denominadas aquí zFr) y zonas tabulares de fracturación denominadas Fr.

Los planos de estratificación S0 varían desde N 134°/29° NE en la salida del túnel a N 113°/12° E a la entrada (en planta los planos S0 se abanicaban hacia el este y en corte se horizontalizan en el mismo sentido), posiblemente por efectos de rotación debido a fallas directas. En la salida tiene un rumbo N 20° y en la entrada N 40° (Figura 8).



Figura 7. a) Vista de fundación del estribo y b) detalle recuadrado de base del puente arco A2 sobre el río Agua de la Peña.

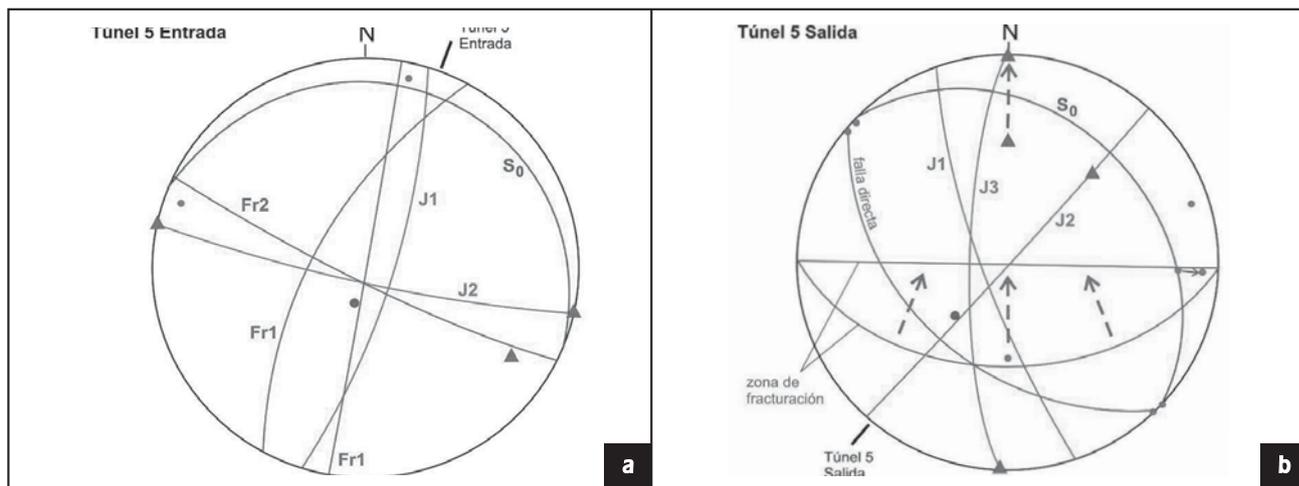


Figura 8. Proyecciones de discontinuidades en el Túnel 5.

En la *entrada* del túnel hay 2 juegos de diaclasas: J1, orientada N 198°/80° E (dominante) y J2, orientada N 282°/85° S (subordinada). Los espaciados son del orden de decímetrometro. Debe notarse aquí la orientación diferente de las diaclasas y la ausencia de J3 con respecto a la *salida* del

El cambio en la orientación de las diaclasas sigue el cambio en la orientación del plano S₀ mencionado más arriba y también un espaciado menor entre los planos S₀.

En la *salida* del túnel se reconocen tres juegos de diaclasas: J1, N 340°/80° SO; J2, N 40°/90°. Un tercer juego de diaclasas (J3), orientadas N 0°/70-80° O, bisecta a los juegos anteriores. Los espaciados son del orden de decímetro–metro (Figura 8).

Tanto las fallas como las fracturas cortan de forma oblicua, con bajos y altos ángulos, al Túnel 5. Además, en tres sectores las fallas directas y las fracturas Fr1 fueron atravesadas durante la construcción del túnel.

Las excavaciones del T5 recibieron tipos de sostenimiento S2 (11%), S3 (81%) y S4 (8%). Se atravesaron algunas fallas menores subverticales y perpendiculares al eje del túnel.

Los principales problemas encontrados durante la excavación fue la caída de bloques de roca formados por la combinación de las familias de discontinuidades. Estas caídas provocaron algunas sobre excavaciones importantes en el sector de la bóveda (figura 9b).

Por último, cabe aclarar que las condiciones de entrada y salida del Túnel 4 son análogas a la del Túnel 5 (orientación media N 30°). La entrada del Túnel 4 es N 40° mientras que la salida es N 50° (orientación media ≈ N 45°).

La excavación del túnel 4 se desarrolló en macizos con sostenimiento tipo S2 (23%), S3 (75%) y S4 (2%) y en condiciones secas. Se observó una falla importante entre progresivas 29+330 y 29+344. Se identificaron las 3 familias de discontinuidades descriptas.

Los principales problemas de estabilidad del macizo rocoso presentes en las excavaciones estuvo relacionado con la remoción de cuñas rocosas inmediatamente después de la voladura y durante el saneo de las excavaciones.

Uno de los problemas más importantes relacionado con los portales de ambos túneles fue la mitigación de caída de bloques de las laderas sobre los mismos. Se estudiaron varias soluciones consistentes en prolongación de falso túnel, más allá de

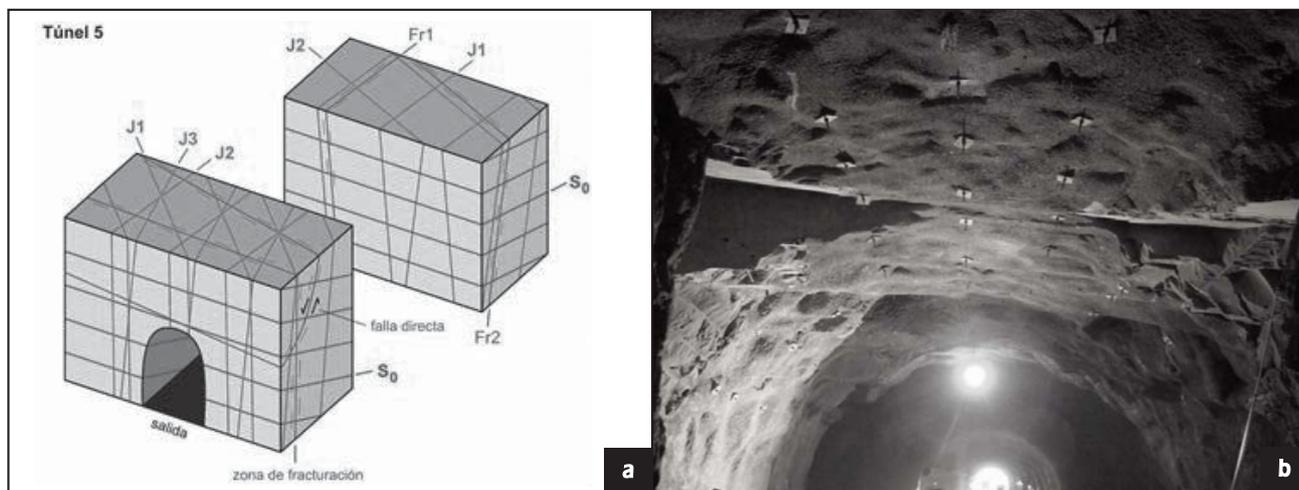


Figura 9. a) Block diagrama de T5 y T4. b) Cuñas caídas de la bóveda.

los 5 m que tenían por diseño, en función de la proyección de la caída de bloques. Finalmente, se optó por la colocación de barreras dinámicas con la capacidad de deformarse para contener esas caídas (Figura 10).



Figura 10. Mitigación de caída de bloques en los portales de salida del T5, con barreras dinámicas.

Formación Chañares-Ischichuca (Triásica, areniscas y limolitas)

Esta formación ha tenido un comportamiento muy diferente a las anteriores, tanto en obras superficiales como subterráneas. La resistencia a la compresión simple es de 50 Mpa y a la tracción es de 3 Mpa. La alternancia de areniscas y pelitas con distintos espesores de estratos produce distintos fenómenos erosivos superficiales.

Afectación en obras superficiales

En relevamientos de imágenes se pudo detectar la existencia de sistemas de fallas directas que han producido deslizamientos de distintas magnitudes (figura 11a). Alguno de ellos se produjeron durante la construcción y otros luego de importantes lluvias (Figura 11b).

Entre las progresivas 22+090 hasta la 22+380, se produjo durante la construcción un incidente significativo, con falla circular del macizo e invasión de la traza. Posteriormente, se pudo observar que los monolitos de medición no mostraban signos de movimiento.

Para verificar el estado de seguridad del talud en las condiciones previas al deslizamiento, se realizó un modelo numérico del talud para simular el deslizamiento observado. Habiéndose verificado la falla, se realizó un retroanálisis para determinar las propiedades medias resistentes del terreno que justifiquen el deslizamiento observado. En la Figura 12 se muestra una fotografía del sector donde puede observarse la cuña de deslizamiento, y se presentan los resultados de la modelación del talud donde se obtiene mediante retroanálisis un factor de seguridad ligeramente inferior a 1, que representa lo ocurrido en el deslizamiento.

Como solución, se relocó la traza en este tramo, luego de alivianar la masa deslizada y canalizar vías de escurrimiento superiores.



Figura 11. En a) se observan paleodeslizamientos, mientras que en b) se presenta uno reciente.



Figura 12. a) Vista de un deslizamiento circular y b) modelación de la estabilidad.

Otro de los fenómenos más comunes de esta formación está constituido por el descalce de estratos rígidos de areniscas por erosión de estratos débiles inferiores, constituidos por lutitas. En general, el buzamiento de ambos es subhorizontal.

Una vez realizada la excavación, las lutitas inferiores, tienen una tendencia a la meteorización en forma acelerada, por lo menos en su componente superficial. Con el paso del tiempo, y las oscilaciones diarias térmicas, o la acción del viento, el material sufre desecación y procesos de contracción y dilatación. En consecuencia se fragmenta y pierde sus componentes cohesivos.

Las areniscas superiores, se presentan en forma de bloques de dimensiones métricas, con planos de diaclasamiento subverticales. Muchos de estos planos se encuentran soldados, dando a la formación una apariencia de medio continuo. La realización de la excavación, y el desconfinamiento lateral de la arenisca tiende a producir la formación de las discontinuidades en sentido vertical, lo cual hace que este nivel ejerza una baja contribución resistencia en la estabilidad global. Cuando la fisura vertical se ha formado, el nivel actúa como una sobrecarga del nivel de lutitas.

Este tipo de problemas amerita el tendido de los cortes y en lo posible, el uso de shotcrete para evitar la erosión.

Afectación en obras subterráneas

Los túneles T3 (203 m), T2 (260 m) y T1 (180 m) se emplazan en esta formación. El conjunto litológico está conformado por areniscas finas limosas y tobáceas, con intercalaciones de limolitas y lutitas oscuras (raramente carbonosas). Hacia arriba gradan a facies de areniscas finas y sedimentos heterolíticos mayormente constituidos por areniscas muy finas y pelitas laminadas intercaladas con bancos de lutitas oscuras. En el Túnel 3 predominan los términos más arenosos, mientras que los Túneles 2 y 3 se ubican en las facies heterolíticas y lutíticas.

Las discontinuidades estructurales reconocidas fueron el Plano de estratificación S_0 , diaclasas (J1 y J2), fracturas y deslizamientos.

El plano S_0 de estratificación tiene una orientación N 124°/15° N. Todo el conjunto litológico está profusamente

diaclasado, lo que afecta más a los términos pelíticos que areniscos. Se reconocen dos juegos de diaclasas: J1, orientada N 98°/90° con un espaciado aproximado de 30 cm, es la más penetrativa y desarrollada. Paralelamente a J1 se desarrolla un clivaje de fractura que genera, en lugar de un plano J1 nítido, una zona tabular de ancho variable a escala decimétrica; J2, orientada N 180°/85° O con un espaciado similar a J1. El efecto del clivaje de fractura y la combinación del diaclasado con S_0 genera bloques menores a 30 x 30 cm, con espesores de cm (lajamiento) en las areniscas y aún menores en las pelitas (lascas). También es posible observar que existen otros juegos menores de diaclasas, orientados según J1, con una inclinación variable de alto ángulo tanto al norte como al sur.

En las cercanías de la salida del Túnel 2, se reconocen fracturas de 20-30 cm de ancho, espaciadas 2-3 m, afectando a areniscas laminadas. Están orientadas N 120°/90°.

Se han observado también aquí zonas de deslizamientos, probablemente inducidos por sismicidad.

En el Túnel 3, que posee un rumbo de N 55°, el plano S_0 es casi paralelo al eje del túnel, mientras que buza unos 15° perpendicularmente a él (Figura 13).

En el Túnel 2, que posee una curvatura en planta de N 110° a la salida y de N 130° a la entrada, la relación de S_0 con las trazas perpendiculares y paralelas a cada una de las orientaciones son diferentes (Figura 13b). La traza paralela al eje del túnel varía desde 5° de buzamiento a casi paralela (1-2°) desde la salida a la entrada respectivamente. Perpendicular al eje del túnel y mirando hacia la salida, la traza de S_0 es paralela y subhorizontal en ambos tramos del túnel.

En el Túnel 1, y paralelamente a su eje, S_0 es oblicua con 12° de buzamiento, mientras que perpendicularmente al eje del túnel es paralela subhorizontal.

En los túneles 1 y 2, excavados en la secuencia rocosa predominantemente pelítica, debido a la posición subhorizontal de las capas, el mecanismo de debilitamiento del macizo se concentró fundamentalmente en la clave del túnel mediante la movilización y caída de placas de roca (Figura 14). En menor medida se observaron caída de pequeños bloques de tamaños centimétricos a decimétricos.

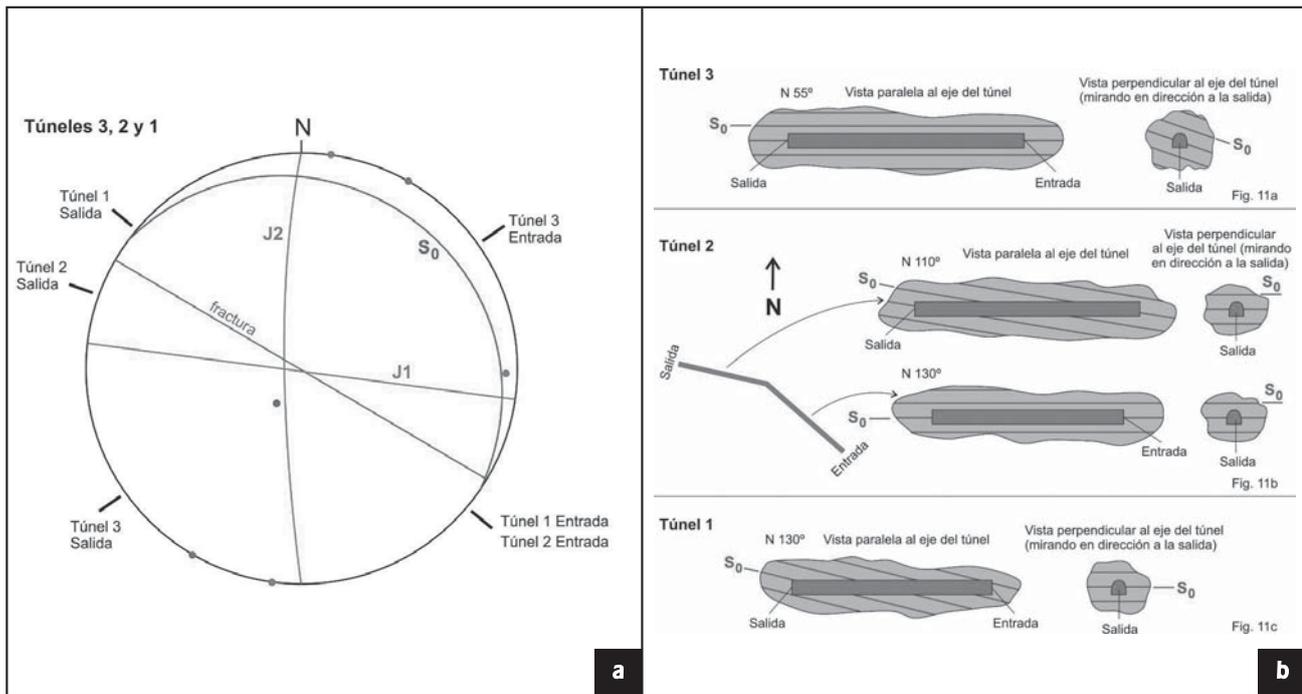


Figura 13. Relación entre el plano de discontinuidad principal S_0 y el eje del túnel (esquemático).



Figura 14. disposición de pelitas del frente de excavación.

La excavación del túnel 1 se desarrolló en macizos predominantemente de tipo S3 (84%) y S4 (16%) y en condiciones secas. Solo se encontró una falla menor entre progresivas 22+530 y 22+566.

La excavación del túnel 2 se desarrolló en macizos de tipo S3 (74%), S3M (9%) y S4 (17%) y también en condiciones secas. Fallas menores fueron mapeadas entre progresivas 23+420 y 23+460.

La excavación del túnel 3 se desarrolló en macizos tipo S4 (74%), S3M (9%) y S4M (26%) y también en condiciones secas. El macizo atravesado corresponde al cuerpo principal de un antiguo deslizamiento (Figura 11). Por este motivo el macizo presentaba un alto grado de fracturamiento distensivo, bloques escalonados y rotados (Figura 15a) y zonas de fallas con relleno de suelo (Figura 15b).



Figura 15. T3. a) Bloques rotados. b) falla paralela al eje longitudinal del túnel.

Las zonas de falla principales que fueron mapeadas tienen rumbo N50° y buzamiento de 70°O, subparalelo al eje del túnel y perpendicular a la dirección de movimiento del deslizamiento. Estas zonas de falla ocasionaron sucesivos problemas de estabilidad en la bóveda del túnel, con colapsos tipo chimenea involucrando decenas de m³ de suelo y roca. Fueron encontradas aberturas entre bloques de hasta 2 m de espesor, indicando el importante desconfinamiento del macizo. La excavación fue muy lenta debido a la necesidad de instalar cerchas metálicas en forma continua.

CONCLUSIONES

Las formaciones sedimentarias de la Sierra de Valle Fértil tienen características distintivas que han condicionado tanto la ejecución de obras superficiales, como cortes de ladera y puentes, como la de los seis túneles excavados.

Las formaciones Tuminico y Talampaya-Tarjados tienen litologías con comportamiento geomecánico de material rígido, areniscas y grauwacas, donde se generan desplazamiento por deslizamiento en función de la orientación de las discontinuidades.

En cambio, las formaciones Chañares-Ischichuca, presentan alternancias de areniscas y lutitas que son erosionadas y se comportan como materiales blandos.

Esto hizo que se generaran cuñas de deslizamientos en los túneles 4 a 7, mientras que en los túneles 1 a 3, se observó

procesos de acampanamiento de la bóveda por rotura de materiales débiles. En T1 y T2, se generaron placas subhorizontales, mientras que en T3, se observó fallamiento directo por relajación tensional generada por el valle del río Agua de la Peña.

Las convergencias medidas con cinta extensométrica mostraron estabilidad al cabo del tiempo de ejecución de los túneles.

Las excavaciones superficiales mostraron diferentes tipos de fallamiento, basados en deslizamiento de bloques, y volcamiento en las formaciones más rígidas. En cambio, en la formación más débil se observó rotura circular como en los suelos. Asimismo, la erosión diferencial de los materiales pelíticos generó descalces de bloques de areniscas.

Las fundaciones de los puentes se realizaron en roca, alguno de los cuales fue necesario rigidizar para mitigar deformaciones, sobre todo durante terremotos.

En general, todos estos tipos de problemas pudieron ser visualizados previamente a la construcción, aunque en el caso de los túneles fue necesario un seguimiento continuo para acomodar el tipo de sostenimiento de acuerdo con las características de los frentes de excavación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección Nacional de Vialidad, Distrito San Juan por el apoyo y permiso para publicar datos de informes y fotografías.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ACEITUNO P., M. GIAMBASTIANI M., R.J. ROCCA AND R.D. MARTINO, 2014.
Geotechnical Characteristics in Road Tunnels of Sierra Valle Fértil. San Juan. Argentina.
WTC 2014. Foz de Iguassu.
- ACEITUNO CIERI P., R.D. MARTINO, M. GIAMBASTIANI. YRJ ROCCA, 2014.
Failure Modes in Road Tunnels of Sierra Valle Fértil. San Juan. Argentina.
Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure. SBMR 2014 -ISRM Specialized Conference 09-13 September, Goiania, Brazil
- BARTON N., R. LIEN AND J. LUNDE, 1974.
Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support.
Rock Mechanics Vol.6 (4):189-236.
- BIENIAWSKI Z.T., 1989.
Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineering and geologist in mining, civil and petroleum engineering.
Wiley 251 pp.
- CUERDA A.J., C.A. CINGOLANI, R.VARELA Y O.C. SCHUAUER, 1979.
Depósitos carbónicos en la vertiente occidental de la sierra del Valle Fértil, provincia de San Juan.
Revista de la Asociación Geológica Argentina Vol. 34 (2): 100-107.
- ROSELLO, E.A., M.E. MOZETIC, P.R. COBBOLD, M. URREIZTIETA, D. GAPAIS AND O.R. LÓPEZ GAMUNDÍ, 1996.
The Valle Fértil flower structure and its relationship with the Precordillera and Pampean Ranges, 30-32° S, Argentina.
Third ISAG, Saint Malo, France, Vol.1: 481-484.
- STIPANIC, P.N., 2002.
El Triásico en la Argentina.
En: Stipanic, P.N., Marsicano, C.A. (Eds.), Léxico estratigráfico de la Argentina, v. 3, Triásico. Asociación Geológica Argentina, Serie B (Didáctica y Complementaria), Vol. 26: 1- 24.